



KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ / KIRIKKALE UNIVERSITY

**Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
International Journal of Engineering Research and Development**

Sahibi / Owner

Ersan ASLAN
Rektör / Rector

Editör/Editor

Ertuğrul ÇAM

Yardımcı Editörler / Associate Editors

Murat LÜY
Özer SEVİM

Alan Editörleri / Area Editors

Atilla ERGÜZEN - Bilgisayar Mühendisliği / Computer Engineering
Enes AYAN - Bilgisayar Mühendisliği / Computer Engineering
Murat İNAL - Biyomühendislik / Bioengineering
Burak BİRGÖREN - Endüstri Mühendisliği / Industrial Engineering
Hacı Mehmet ALAKAŞ- Endüstri Mühendisliği / Industrial Engineering
Tolga EREN - Elektrik-Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronics Engineering
Ali Payıdar AKGÜNGÖR - İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering
Ersin KORKMAZ - İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering
Hakan ARSLAN - Makine Mühendisliği / Mechanical Engineering
Tolga DEMİRCAN - Makine Mühendisliği / Mechanical Engineering
Tuna AYDIN – Metalurji ve Malzeme Mühendisliği / Metallurgical and Materials Engineering
Aziz Barış BAŞYİĞİT – Metalurji ve Malzeme Mühendisliği / Metallurgical and Materials Engineering

Dergi Sekreteryası / Journal Secretariat

Hüseyin AYDİLEK
Buğra HATİPOĞLU

Yazışma Adresi /Address

Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi
71450-Kampüs- Kırıkkale- TÜRKİYE

<http://ijerad.kku.edu.tr>

ijerad@kku.edu.tr

Tel : +90-318-357-42 42 (1001)

Fax: +90-318-357-24 59

ISSN- Online: 1308-5514

Ocak 2021 / January 2021

Kapak Tasarım / Graphics Design: Hüseyin AYDİLEK

Danışma Kurulu / Editorial Board
(*Alfabetik Sıralama / Alphabetical*)

- A. Serdar YILMAZ Sütçü İmam Üniversitesi
Ahmet Kürşat TÜRKER Kırıkkale Üniversitesi
Ali Payıdar AKGÜNGÖR Kırıkkale Üniversitesi
Ayten ÇELEBİ KESKİN Kırıkkale Üniversitesi
Hasan Şakir BİLGE Gazi Üniversitesi
Hüseyin CANBOLAT Yıldırım Beyazıt Üniversitesi
İbrahim UZUN Kırıkkale Üniversitesi
İlhami DEMİR Kırıkkale Üniversitesi
İlhan KOCAARSLAN İstanbul Üniversitesi
İsa NAVRUZ Ankara Üniversitesi
M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU Gazi Üniversitesi
M. Tunay GENÇOĞLU Fırat Üniversitesi
Mehmet Ali AKÇAYOL Gazi Üniversitesi
Metin DAĞDEVİREN Gazi Üniversitesi
Mustafa YİĞİTOĞLU Kırıkkale Üniversitesi
Mustafa TÜRK Kırıkkale Üniversitesi
Nihat İNANÇ Kırıkkale Üniversitesi
Osman YILDIZ Kırıkkale Üniversitesi
Ömer Muhammet SOYSAL Louisiana State University
Recep ÇALIN Kırıkkale Üniversitesi
Süleyman ERSÖZ Kırıkkale Üniversitesi
Tamer EREN Kırıkkale Üniversitesi



KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ / KIRIKKALE UNIVERSITY

Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi
International Journal of Engineering Research and Development

Amaç

Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi mühendisliğin tüm disiplinlerinde çalışılmış olan orijinal ve yüksek kalitedeki araştırma sonuçlarını basan ve teşvik eden bir araştırma dergisidir. Akademisyenler, bilim adamları, üniversitelerdeki araştırmacılar ve ilgi duyan herkesin çalışmalarını basım için düşünebilir.

Aim

International Journal of Engineering Research and Development is a peer-reviewed international research journal aiming at promoting and publishing original high-quality research in all disciplines of engineering sciences and technology. Manuscripts are invited from academicians, scientists, researchers of universities and industry and for all interested people for publication consideration.

Araştırma Alanı

Mühendislik Teorisi ve Uygulamaları

Research Highlights

Engineering Theory and Applications

Kapsam

Derginin ilgi alanlarında, sınırlama olmaksızın, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Makina Mühendisliği, İnşaat Mühendisliği, Bilgisayar Mühendisliği ve Endüstri Mühendisliği bulunmaktadır.

Scope

Areas includes (but not limited to) all issues in Electrical&Electronics Engineering, Mechanical Engineering, Civil Engineering, Computer Engineering and Industrial Engineering.

Yazarlara Bilgi

Ayrıntılı bilgi için lütfen <http://ijerad.kku.edu.tr/> adresini ziyaret ediniz.

Authors Information

For detailed information please visit <http://ijerad.kku.edu.tr>

Yayın Etiği

Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi (UMAGD) temel olarak, ICMJE (International Committee of Medical Journal Editors) tavsiyeleri ile COPE (Committee on Publication Ethics)'un Editör ve Yazarlar için Uluslararası Standartları'na uymayı taahhüt etmektedir.

UMAGD, bilime hizmet etmek amacıyla tüm yayın süreçlerini tarafsız, saygın, hesap verebilir bir şekilde yürütmeyi taahhüt eder. Bu doğrultuda, yazarların din, dil, ırk gibi farklılıklarını gözetmeksizin çalışmalarını etik kurallara uygun ve adil olarak değerlendirmektedir.

UMAGD, yayınlanmak üzere başvuru alan çalışmayı en az iki hakem tarafından kör hakem değerlendirilmesi usullerine uygun olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır. Yazar ve hakemlerin kimlik bilgileri ve çalışmanın gizli kalacağı UMAGD'nin garantisidir.

UMAGD, çalışmayı değerlendirmek üzere alanında uzman kişileri hakem olarak seçmektedir.

UMAGD tarafından yayınlanan makaleler, bilime katkı sağlayan, özgün ve başka bir yerde ve/veya başka bir dilde yayınlanmamış makalelerdir.

UMAGD, tüm paydaşları arasında çıkar çatışmasının oluşmasına müsaade etmez. Çalışmanın muhattapı olan kişi ve kurumların zarar görmesini engelleyecek şekilde değerlendirme süreçlerini yönetir.

UMAGD, etik kuralların ihlal edildiğini belirlediği tüm makaleler için düzeltme yayını yayınlamayı ve paydaşlarını bilgilendirmeyi taahhüt eder.

UMAGD'de yayınlanan tüm eserlerin telif hakkı UMAGD'ye aittir. Bu eserlerin izinsiz olarak veya referans verilmeden kullanılmasına izin vermez.

Yazar, çalışmanın orijinal, başka yerde ve başka dilde yayınlanmamış / yayınlanmak üzere değerlendirilmeye alınmamış, etik kaygılar içermediği konusunda taahhütte bulunmalıdır. Çalışmalarda kullanılan görsel, şekil, tablolar ve alıntılar için gerekli izinler alınmalı, referans ve teşekkürle belirtilerek kullanılmalıdır. Telif ile ilgili kanunlara riayet edilmelidir.

Çalışmada yer alan tüm yazarların çalışmaya bilimsel olarak katkısı olmalı, yazar sıralaması en çok katkı sağlayan yazardan daha az katkı sağlayan yazara doğru olmalıdır. Yazar sıralamasında tüm yazarların rızası alınmalıdır. Çalışmaya yazar olacak kadar yeterli katkısı olmayan kişiler ile kurumlar teşekkür kısmında belirtilmelidir.

Çalışmayı değerlendirmek üzere gönderilen daveti kabul eden hakemler, değerlendirme sürecinde etik kurallara uymayı, çalışmanın içeriğinin gizli tutulmasını ve tarafsız bir yargıya varacağını kabul etmiş sayılır.

Çalışma değerlendirme sürecinde hakemler, çalışma hakkında bilgi danışmak / tartışmak üzere 3. kişiler ile yayın hakkında görüşmemeyi, çalışmanın içeriğini korumayı taahhüt ederler.

Araştırma Etiği

Araştırma konusunun seçiminde insalığın ve bilimin yararı gözetilmelidir. Yapılan çalışmalar şeffaf ve hesap verilebilir olmalıdır.

Araştırma konusuna uygun olarak etik kurul izinleri ve gerekli yasal/özel izin belgeleri alınmalıdır. İzinsiz veya etik bulunmayan araştırmalar yapılmamalıdır.

Araştırma insan ve / veya hayvan deneklerinin kullanımını gerektiriyor ise çalışmanın uluslararası deklarasyon, kılavuz vb. uygun gerçekleştirildiği beyan edilmelidir.

Araştırmacılar araştırmaya katılan kişileri, kurum ve kuruluşları araştırmanın konusu, yöntemi, beklenen çıktı ve olası kullanımları ile içerdiği riskler hakkında şeffaf bir şekilde bilgilendirmelidirler.

Araştırmaya katılan kişiler tamamen gönüllü olarak katılmalı, zorlama altında olmamalıdır. Katılımcılardan, araştırmaya başlamadan önce rıza belgesi alınmalı, istenildiği takdirde ibraz edilebilmelidir. 18 yaşından küçükler ile vesayet altında olan kişilerin yasal vasisinden rıza onayı alınmalıdır.

Araştırmacılar, katılımcıları riske sokmayacak şekilde çalışmalarını gerçekleştirmelidirler.

Araştırmacılar, katılımcıların kişisel bilgileri ile sağladıkları diğer bilgilerin gizliliğini sağlamalıdır. Katılımcıların, maddi veya manevi zarar görmelerine neden olacak paylaşımlara izin vermemelidirler.

Araştırmacılar, çalışma sonuçlarının herhangi bir ülke veya bölgede yaşayan kişileri, farklı dil, din, ırk gibi özelliklere sahip olan insanların maddi veya manevi olarak zarar görmelerine izin vermemelidirler.

Etik Kurulu ve Yasal / Özel İzin Belgesi Alınması

Aşağıdaki hususlarda araştırma yapmak için “Etik Kurul İzni” gerekmektedir.

- Anket, mülakat, odak grup çalışması, gözlem, deney, görüşme teknikleri kullanılarak katılımcılardan veri toplanmasını gerektiren nitel ya da nicel yaklaşımlarla yürütülen her türlü araştırmalar
- İnsan ve hayvanların (materyal/veriler dahil) deneysel ya da diğer bilimsel amaçlarla kullanılması,
- İnsanlar üzerinde yapılan klinik araştırmalar,
- Hayvanlar üzerinde yapılan araştırmalar,
- Kişisel verilerin korunması kanunu gereğince retrospektif çalışmalar.

Ayrıca;

- Olgu sunumlarında “Aydınlatılmış onam formu”nun alındığının belirtilmesi,
- Başkalarına ait ölçek, anket, fotoğrafların kullanımı için sahiplerinden izin alınması ve belirtilmesi,
- Kullanılan fikir ve sanat eserleri için telif hakları düzenlemelerine uyulduğunun belirtilmesi gereklidir.
- Araştırmacılar, etik kurulu onayı gerektiren tüm çalışmalar için bölgelerinde bulunan etik kurullarına başvurarak gerekli izinleri almalıdırlar.
- Etik kurul iznine ait kurul adı, değerlendirme tarihi ve etik izin belgesi sayı numarası belirtilecek şekilde çalışmanın yöntem kısmında yer almalıdır.
- Çalışmanın değerlendirilmek üzere sisteme yüklenmesi esnasında, etik kurul izni belgesinin kopyasında sisteme yüklenmesi gerekmektedir.
- Çalışmanın bir kuruma ait verileri içermesi durumunda ilgili kurumdan verilerin kullanılmasına rıza gösterdiğine dair özel izin alınmalıdır. İzin veren kurum bilgisi ile hangi verilerin kullanılmasına izin verdiği teşekkür bölümünde belirtilmelidir.
- Çalışmanın özel mülkiyete ait bir alanda geçmesi durumunda ilgili kişi ve kurumdan elde edilen verilerin kullanılmasına rıza gösterdiğine dair özel izin alınmalıdır. İzin veren kişi ve kurum bilgisi ile hangi verilerin kullanılmasına izin verdiği teşekkür bölümünde belirtilmelidir.
- Çalışmanın girişi veya tahribatı özel izin gerektiren bir alanda gerçekleşmesi durumunda ilgili kurumlardan araştırmanın gerçekleştirilmesi için özel izin alınmalıdır. İzin veren kuruluşların bilgisi ile izin türü hakkında teşekkür bölümünde bilgi verilmelidir.
- Çalışmanın değerlendirilmek üzere sisteme yüklenmesi esnasında, alınan özel izin belgelerinin bir kopyasında sisteme yüklenmesi gerekmektedir.
- Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi herhangi bir itilaf çıkması durumunda hukuki haklarını saklı tutmaktadır.

Publication Ethics

International Journal of Engineering Research and Development (IJERAD) basically undertakes to comply with the recommendations of ICMJE (International Committee of Medical Journal Editors) and the International Standards for Editors and Authors of COPE (Committee on Publication Ethics).

IJERAD undertakes to carry out all publishing processes in an impartial, respectable and accountable manner in order to serve science. In this respect, it evaluates the works of the authors as ethical and fair, regardless of differences such as religion, language, race.

IJERAD ensures that the study applied for publication is evaluated by at least two referees in accordance with the blind referee evaluation procedures. The identity information of the authors and referees and that the work will be kept confidential are under the guarantee of IJERAD.

IJERAD selects experts in their fields as referees to evaluate the study.

Articles published by IJERAD are original articles that contribute to science and have not been published elsewhere and / or in any other language.

IJERAD does not allow any conflict of interest between all of its stakeholders. Manages the evaluation processes in a way that prevents the persons and institutions that are the addressee of the study from being harmed.

IJERAD undertakes to publish correction publication and inform its stakeholders for all articles that it determines that the ethical rules are violated.

The copyright of all works published in IJERAD belongs to IJERAD. It does not allow these works to be used without permission or reference.

The author must make a commitment that the study is original, not published elsewhere or in another language / evaluated for publication, and does not contain ethical concerns. Necessary permissions should be obtained for the visuals, figures, tables and quotations used in the studies, and they should be used with reference and acknowledgment. Copyright laws must be respected.

All authors involved in the study should have a scientific contribution to the study, and the author order should be correct from the most contributing author to the less contributing author. Consent of all authors must be obtained in the author ranking. Individuals and institutions that do not contribute enough to be authors to the study should be stated in the acknowledgment section.

The referees who accept the invitation sent to evaluate the study are deemed to have accepted to comply with ethical rules during the evaluation process, to keep the content of the study confidential and to reach an impartial judgment.

In the study evaluation process, the referees undertake not to meet with third parties about the publication to consult / discuss information about the study, and to protect the content of the study.

Research Ethics

The benefits of humanity and science should be considered in the selection of the research topic. Studies should be transparent and accountable.

Ethical board permissions and necessary legal / special permissions should be obtained in accordance with the research subject. Unauthorized or unethical research should not be done.

If the research requires the use of human and / or animal subjects, international declaration, guideline etc. it must be declared appropriate.

Researchers should transparently inform research participants, institutions and organizations about the subject, method, expected output, possible uses and risks involved.

People participating in the research should participate completely voluntarily and not be under coercion. Before starting the research, a consent document must be obtained from the participants and can be presented if requested. The consent of those under the age of 18 and under guardianship must be obtained from their legal guardian.

Researchers should conduct their work in a way that does not put participants at risk.

Researchers should ensure the confidentiality of participants' personal information and other information they provide. Participants should not allow sharing that may cause material or moral damage.

Researchers should not allow people living in any country or region, or people with different language, religion, race, etc., to suffer material or moral harm.

Ethics Committee and Obtaining Legal / Special Permit Certificate

Ethics Committee Permission is required to conduct research on the following issues.

- All kinds of research conducted with qualitative or quantitative approaches that require data collection from participants using questionnaires, interviews, focus group work, observation, experimentation, interview techniques,
- Using humans and animals (including material / data) for experimental or other scientific purposes,
- Clinical researches on humans,
- Researches on animals,
- Retrospective studies in accordance with the law on protection of personal data.

Also;

- Stating that "Informed Consent Form" was obtained in case presentations,
- Obtaining permission from the owners for the use of scales, questionnaires and photographs belonging to others,
- It should be stated that the copyright regulations are complied with for the intellectual and artistic works used.
- Researchers must obtain the necessary permissions by applying to the ethics committees in their region for all studies that require ethics committee approval.
- The name of the ethics committee for permission, the date of evaluation and the number of the ethical permission document should be included in the method part of the study.
- While the study is uploaded to the system for evaluation, a copy of the ethics committee permission document must be uploaded to the system.
- In case the study includes data belonging to an institution, special permission must be obtained from the relevant institution that the data is used. The information of the permitting institution and what data it allows to use should be specified in the acknowledgment section.
- If the study takes place in a privately owned area, special permission must be obtained indicating that he consents to the use of the data obtained from the relevant person and institution.
- The information about the person and institution that gave permission and which data they allow to be used should be specified in the acknowledgment section.
- In case the entry or destruction of the study takes place in an area that requires special permission, special permission must be obtained from the relevant institutions to carry out the research. Information about the permitting organizations and the type of permit should be given in the acknowledgment section.
- While the study is uploaded to the system for evaluation, a copy of the special permits received must be uploaded to the system.
- International Journal of Engineering Research and Development reserves its legal rights in case of any dispute.

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

- Bozçaldağ Mermerlerinin Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması**
- 1 *Investigation of Bozçaldağ Marble's Effects on Physical and Mechanical Properties of Concrete* 296-309
Gökhan Ekincioğlu, Serdar Korkmaz, Zeynel Başbüyük
DOI: 10.29137/umagd.812163
- Atık Madde İçeren Polimer Bazlı Kompozitlerin Isıl İletkenlik Özelliklerinin İncelenmesi**
- 2 *Investigation of Thermal Conductivity Properties of Polymer Based Composites Containing Waste Materials* 310-320
Mehmet Nuri Kolak, Meral Oltulu
DOI: 10.29137/umagd.822265
- Panel Güneş Kolektörlerinde Farklı Emici Yüzey Geometrilerinin Kullanımının Isıl Karakteristiklere olan Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi**
- 3 *Numerical Analysis Of The Effect Of The Use Of Different Absorbent Surface Geometries On Thermal Characteristics in Panel Solar Collectors* 321-328
Raşit Çelik, Ömer Resuloğulları, Ali Erişen
DOI: 10.29137/umagd.845331
- Kardan Şaftı Mukavemet ve Yorulma Ömür Analizi Örnek Uygulaması: 4x2 Ticari Araç Kardan Şaftı**
- 4 *Strength and Fatigue Life Analysis Study of Cardan Shaft A Case Study: 4x2 Commercial Vehicle Cardan Shaft* 329-338
Can Çivi, Necati Tahralı
DOI: 10.29137/umagd.811192
- Betonarme Kirişlerin Sarılma Bölgesi Uzunluğunun Araştırılması Üzerine Bir Çalışma**
- 5 *A Study on Investigation of Length of Hugging Zone of Reinforced Concrete Beams* 339-349
Sinan Cansız
DOI: 10.29137/umagd.728936
- Uçak Çakışma Saptama ve Çözümleme Problemi için Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama Modeli Yaklaşımı**
- 6 *A Mixed Integer Linear Programming Approach for Aircraft Conflict Detection and Resolution Problem* 350-358
Ramazan Kürşat Çeçen
DOI: 10.29137/umagd.736065
- 2007 ve 2019 Deprem Yönetmeliklerinde Betonarme Binalar İçin Yer Alan Farklı Deprem Kuvveti Hesaplama Yöntemlerinin Karşılaştırılmalı Olarak İrdelenmesi**
- 7 *Comparative Investigation of Different Earthquake Load Calculation Methods for Reinforced Concrete Buildings in the 2007 and 2019 Codes* 359-374
Ceyhan Aksoylu, Musa Hakan Arslan
DOI: 10.29137/umagd.844186
- Reaksiyon Bağlı Silisyum Nitrür Seramiklerinde Sinterleme İlavesinin Mikroyapı ve Antibakteriyel Davranışa Etkisinin İncelenmesi**
- 8 *Investigation of the Effect of Sintering Additive on the Microstructure and the Antibacterial Behavior of Reaction Bonded Silicon Nitride Ceramics* 375-381
Şeniz Reyhan Kuşhan Akın
DOI: 10.29137/umagd.793123

- B2O3 Katkılı M-Tipi Baryum Hekzaferrit Kompozit Kalıcı Mıknatısın Üretimi ve Karakterizasyonu**
9 *Production and Characterization of B2O3 Added M-Type Barium Hexaferrite Composite Magnet* 382-389
Gülten Sadullahoğlu
DOI: 10.29137/umagd.737894
- Adaptif Sinyalize Kavşaklar için Derin Öğrenme Yaklaşımı ile Gecikme Modelleri Geliştirilmesi**
10 *Development of Delay Models with a Deep Learning Approach for Adaptive Signalized Intersections* 390-405
Berk Bayraktar, Erdem Doğan
DOI: 10.29137/umagd.843300
- AI Matrisli Kompozitlere ANFIS, ANN ve Taguchi Yaklaşımları Uygulanarak Özelliklerin Karşılaştırılması**
11 *Comparison of Properties by Applying ANFIS, ANN and Taguchi Approaches to AI Matrix Composites* 406-416
Engin Ergül, Halil Kurt
DOI: 10.29137/umagd.833300
- Hedef Programlama ile Toplu Ulaşımında Araç Çizelgeleme Probleminin Çözümü: Kırıkkale Kampüs Hattı Örneği**
12 *The Solution of Vehicle Scheduling Problem in Public Transport with Goal Programming: Kırıkkale Campus Line Case* 417-427
Hacı Mehmet Alakaş, Emre Yazıcı
DOI: 10.29137/umagd.830236
- Comparison of the Surface Quality of the Products Manufactured by the Plastic Injection Molding and SLA and FDM Method**
13 428-437
Özgür Özduş
DOI: 10.29137/umagd.762942
- Kompozit Yamalar ile Tamir Edilmiş Çatlaklı Sandviç Kirişlerin Eğilme Darbe Davranışları**
14 *Flexural impact Response of Cracked Sandwich Beams Repaired by Composite Patches* 438-447
Umut Çalışkan, Recep Ekici, Mustafa Kemal Apalak
DOI: 10.29137/umagd.846692
- Medikal İşletmesi İçin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Bakım Stratejisi Seçimi**
15 *Maintenance Strategy Selection with Multi Criteria Decision Making Methods for Medical Company* 448-461
Rabia Akgönül, Evrencan Özcan, Tamer Eren
DOI: 10.29137/umagd.865866
- Termokromik Pigment İçeren Kaplamalarda İşlem Sıcaklık Etkisi**
16 *Temperature Effect in Thermochromic Pigment Containing Coatings* 462-477
Lale Civan, Semra Kurama, Erhan Ayas
DOI: 10.29137/umagd.874818
- OFDM-AIM İletim Tekniği için Karınca Kolonisi Optimizasyon Algoritması Tabanlı Alt-Blok Set Tasarımı**
17 *Ant Colony Optimization Algorithm Based Sub-Blocks Set Design for OFDM-AIM Transmission Technique* 478-488
Mahmut Yıldırım
DOI: 10.29137/umagd.859150

- AA7075 Matrisli B4C+SiC Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Toz Takviyeli EEİ Yöntemiyle İşlenmesinde Boşalım Akımı ve Takviye Oranının İşlenmiş Yüzeyin Mikroyapısı ve Pürüzlülüğüne Etkisi**
- 18 *The Effect of Discharge Current and Reinforcement Ratio on the Microstructure and Roughness of the Machined Surface in the Machining of AA7075 Matrix B4C+SiC Reinforced Hybrid Composites by Powder Reinforced EDM Method* 489-495
Gözde Keskin, Gökhan Küçüktürk, Muharrem Pul, Hakan Gürün, Volkan Baydaroğlu
DOI: 10.29137/umagd.885976
- Tarihi Hundi Hatun (Kunç) Köprüsünün Artan Trafik Yüğü Altında Davranışının İncelenmesi**
- 19 *Investigation of Behaviour of Historical Hundi Hatun (Kunç) Bridge Under Increasing Traffic Load* 496-507
Burçin Şenol Şeker, Murat Gökçe
DOI: 10.29137/umagd.823912
- İri Agrega Olarak İnşaat Yıkıntı Atığı, İnce Agrega Olarak Doğal ve Kıрма Kum Kullanılan Betonun Bazı Mühendislik Özelliklerinin İncelenmesi**
- 20 *Investigation of Some Engineering Properties of Concrete Using Construction Wreckage Waste as Coarse Aggregate, Natural and Crushed Sand as Fine Aggregate* 508-520
Mustafa Kürşad Korkut, Osman Şimşek
DOI: 10.29137/umagd.879038
- An Improved Algorithm for Minimizing Makespan on Flowshops with Uncertain Processing Times**
- 21 521-530
Ali Allahverdi, Muberra Allahverdi
DOI: 10.29137/umagd.887624
- Optimization of Fuel Cost in Electric Power Systems using Harmony Search Algorithm**
- 22 531-544
Ayşe Erdoğan Yıldırım
DOI: 10.29137/umagd.814025
- Betonarme Kolonların Yerdeğiştirme Kapasitesi Tahmini için Analitik Çalışma**
- 23 *Analytical Study for Estimation of Displacement Capacity of Reinforced Concrete Columns* 545-562
Sinan Cansız
DOI: 10.29137/umagd.867517
- Yapay Zekâ ile Kızılcâm (Pinus brutia Ten.) ve Karaçâm (Pinus nigra Arnold.) Ağaçlarında Üst Boy Tahmini**
- 24 *Upper Height Prediction in Turkish Red Pine (Pinus brutia Ten.) and Black Pine (Pinus nigra Arnold.) with Artificial Intelligence* 563-572
Emre Kuzugüdenli
DOI: 10.29137/umagd.851315
- Birden Fazla Boşluklu Çift Doğrultulu Betonarme Döşemelerin Zımbalama Performansının İyileştirilmesi için Tekstil ile Güçlendirilmiş Sıva Şeritler ile Güçlendirilmesi**
- 25 *Improving Punching Behavior of RC Two Way Slab with Multiple Openings Strengthened by using Textile Reinforced Mortar Strip* 573-582
Ömer Mercimek, Rahim Ghoroubi, Özgür Anıl, Mehmet Baran
DOI: 10.29137/umagd.889474
- Finansal Oranları Kullanarak Havayolu Şirketlerinin Performans Değerlendirmesi**
- 26 *Performance Evaluation of Airlines Using Financial Ratios* 583-599
Aşır Özbek, Masoumeh Ghouchi
DOI: 10.29137/umagd.871702

- Bir Isı Borusunun Akış ve Isı Transfer Karakteristiklerinin Sayısal Olarak İncelenmesi**
27 *Numerical Investigation of Flow and Heat Transfer Characteristics of a Heat Pipe* 600-611
Mevlüt Emre Aslantaş, Tolga Demircan
DOI: 10.29137/umagd.878818
- Cam Atık Çamuru ile Güçlendirilmiş Kilin Mukavemet, Oturma ve Şişme Davranışlarının İncelenmesi: Çevre Dostu Bir Zemin İyileştirme Yaklaşımı**
28 *Investigation of Strength, Settlement and Swelling Behavior of Glass Waste Sludge Treated Clay: An Eco-Friendly Soil Improvement Approach* 612-624
Barış Mahmutluoğlu, Baki Bağrıaçık
DOI: 10.29137/umagd.771453
- Epoksi Emdirilmiş Karbon Lifi Sargılı Çelik Donatıların Aderans Dayanımı**
29 *Bond Strength of Epoxy Impregnated Carbon Fiber Wrapped Steel Reinforcement* 625-634
Erkan Türkmen Dönmez, Boğaçhan Başaran
DOI: 10.29137/umagd.897284
- Dielectric Properties of BN-ZnO-GNP Doped PU-EG Composites**
30 *Safa Polat* 635-644
DOI: 10.29137/umagd.896904
- Aktif Karbon Katkılı Kumaş/Gümüş Nanopartikül Kompozitin Hazırlanması**
31 *Preparation of Silver Nanoparticle/Activated Carbon-Reinforced Fabric Composite* 645-652
Şule Ocak Araz, Hüseyin Kaya
DOI: 10.29137/umagd.911364
- Ti-6Al-4V Alaşımının Tornalanmasında Minimum Miktarda Yağlama (MMY) Yöntemi İle Kesme Sıvısı Uygulamanın İşlenebilirliğe Etkilerinin Araştırılması**
32 *Investigation of the Effects of Cutting Fluid Application on Machinability by Using the Minimum Quantity Lubrication (MQL) Method in Turning Ti-6Al-4V Alloy* 653-665
Kanay Zeyrek, Ali Osman Er
DOI: 10.29137/umagd.907630
- Üniversal Motorun Yumuşak Manyetik Kompozit-Amorf ve M19 Malzemeleriyle Oluşturulmuş Nüve Formlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi Analizi ile Performans Karşılaştırması**
33 *Performance Comparison of Universal Motor Under Different Core Materials Soft Magnetic Composites-Amorphous and M19 Using with Finite Element Method Analysis* 666-679
İsmail Topaloğlu
DOI: 10.29137/umagd.846396
- Mobil Robotların Formasyon Kontrolünde Giriş Kısıtlamaları**
34 *Input Constraints in Formation Control of Mobile Robots* 680-689
Meral Kılıçarslan Ouach, Tolga Eren
DOI: 10.29137/umagd.908696
- The Synthesis and Anticancer Activities of Ferrocenyl Chalcones; Drug-Likeness Calculations**
35 *Emine Albayrak Sarıca, Özer Işıl, Mutluhan Bıyıkoğlu, Ayşe Sahin Yaglioglu, Adnan Bulut* 690-703
DOI: 10.29137/umagd.927358
- An Investigation of Production and Properties of RHA Reinforced Hybrid Composites by Vacuum Infiltration Method**
36 *Naci Arda Tanış, Onur Okur, Erkan Yılmaz, Mustafa Türkmen, Azmah Hanim Binti Mohamed Ariff, Temitope T. Dele-Afolabi, Recep Çalın* 704-710
DOI: 10.29137/umagd.913816

- Türkiye’de 50MW Üstü GES Üretimi Gerçekleştiren Şehirlerimizde Agrivoltaic Sistem Kullanılabilirliğinin İncelenmesi**
37 *Investigation Of Agrivoltaic System Usability Generating Over 50MW Of SPP Different Cities in Turkey* **711-718**
Atıl Emre Cosgun
DOI: 10.29137/umagd.892391
- Kablosuz Sensör Ağlarında Parçacık Sürü Optimizasyonu, Sürekli Zaman Karınca Koloni Algoritması ve Girdap Arama Algoritması Yöntemleri ile Konum Belirleme**
38 *Localization with Particle Swarm Optimization, Continuous Time Ant Colony Algorithm and Vortex Search Algorithm Methods in Wireless Sensor Networks* **719-732**
Feyza Nur Çakıcı, Tolga Eren
DOI: 10.29137/umagd.947878
- Kullanıcı Perspektifli Çok Kriterli Karar Verme ile Elektrikli Araçlarda Batarya Seçimi**
39 *Multicriteria Decision Making Based on User Perspective for Battery Selection in The Electric Vehicles* **733-749**
Mustafa Hamurcu, Emine Çakır, Tamer Eren
DOI: 10.29137/umagd.906805
- Usage of Waste Water Treatment Plants Hydroelectric Energy for Urban Lighting Energy: The Case of Turkey**
40 *Burhan Baran* **750-762**
DOI: 10.29137/umagd.882607



Bozçaldağ Mermerlerinin Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması

Investigation of Bozçaldağ Marble's Effects on Physical and Mechanical Properties of Concrete

Gökhan Ekincioglu^{1*}, Serdar Korkmaz², Zeynel Başbüyük³

¹Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Kaman Meslek Yüksekokulu Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, 40100 ve Kırşehir, TÜRKİYE

²Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Kaman Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü, 40100 ve Kırşehir, TÜRKİYE

³Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 40300 ve Kırşehir, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 19/10/2020

Kabul / Accepted: 07/01/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 29/01/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Bu çalışma kapsamında Kırşehir bölgesi Bozçaldağ formasyonu içerisinde dört farklı bölgeden temin edilen mermerlerin agregata olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. Temin edilen agregata örneklerinin öncelikle kimyasal analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonrasında da fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Temin edilen agregatardan aynı şartlar ve aynı karışım oranlarında beton üretilmiş olup elde edilen beton karot örneklerinin mühendislik özellikleri incelenmiştir. Dolomit mineral içeriği yüksek olan A bölgesindeki agregatlarla üretilen betonun ultrasonik ses dalgası, tek eksenli basınç dayanımı ve Schmidt sertlik değerlerinin diğer bölgelere göre yüksek olduğu belirlenmiştir. Çalışma bölgesindeki agregatların aynı formasyondan temin edilmesine rağmen farklı fiziksel ve jeokimyasal özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle beton üretiminde standardizasyonun sağlanması açısından ocaktan agregata üretimi sonrasında belirli periyotlar halinde agregata özelliklerinin standartlar çerçevesinde belirlenmesi önem arz etmektedir.

Anahtar Kelimeler

"Agregata, Mermer, Betonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri, Kırşehir Bozçaldağ Formasyonu"

Abstract

Within the scope of this study, the usability of marbles obtained from four different regions in the Bozçaldağ formation of Kırşehir region as aggregate was investigated. First of all, chemical analyzes of the obtained aggregate samples were carried out. Then, its physical properties were determined. Concretes were produced in the same conditions and mixing ratios from the supplied aggregates. Afterwards, the engineering properties of the concrete core samples were examined. It has been determined that the concrete produced with aggregates in zone A with high dolomite mineral content has higher ultrasasic sound wave, uniaxial compressive strength and Schmidt hardness values compared to other regions. In the study, it was determined that the aggregates in its region have different physical and geochemical properties although they are obtained from the same formation. For this reason, it is important to determine the aggregate properties within the framework of the relevant standards in certain periods after the aggregate production from the quarry in order to achieve the desired standardization in concrete production.

Key Words

"Aggregate, Marble, Physical and Mechanical Properties of Concrete, Kırşehir Bozçaldağ Formation"

1. Giriş

Beton gerektiğinde kimyasal ve mineral katkı kullanılabilen ancak esasen çimento, su ve agregadan oluşan en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Betonun performansı bileşenlerinin karakteristik özelliklerine doğrudan bağlıdır (Tekin vd. 2017). Sertleşmiş beton hacminin %60-70'ini agrega hacmi, geriye kalan % 30'unu ise çimento hamuru ve hava boşluğu hacmi oluşturmaktadır. Agregaların tek başına bir bağlayıcılık özelliği yoktur. Beton bünyesinde dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. Agregaların bir arada tutabilmek için bağlayıcı malzeme olarak çimento kullanılmaktadır. Çimento hamurunun mukavemeti betonun mukavemetinden daha yüksektir. Fakat betonun sadece çimento hamuru ile üretilmesi ekonomik olmamaktadır. Dolayısıyla çimento hamuruna dolgu malzemesi olarak agrega ilave edilmektedir. Agreganın çimentodan daha kolay temin edilebilmesi ve daha ucuz olması, atmosfer etkilerine, çeşitli kimyasal etkilere ve aşınmaya karşı çimentodan dayanıklı olması, ayrıca çimentonun prizi sırasında meydana gelen şişme ve rötre gibi hacimsel hareketlerin agregada görülmemesi kullanımını zorunlu kılmaktadır (Güner ve Süme, 2001).

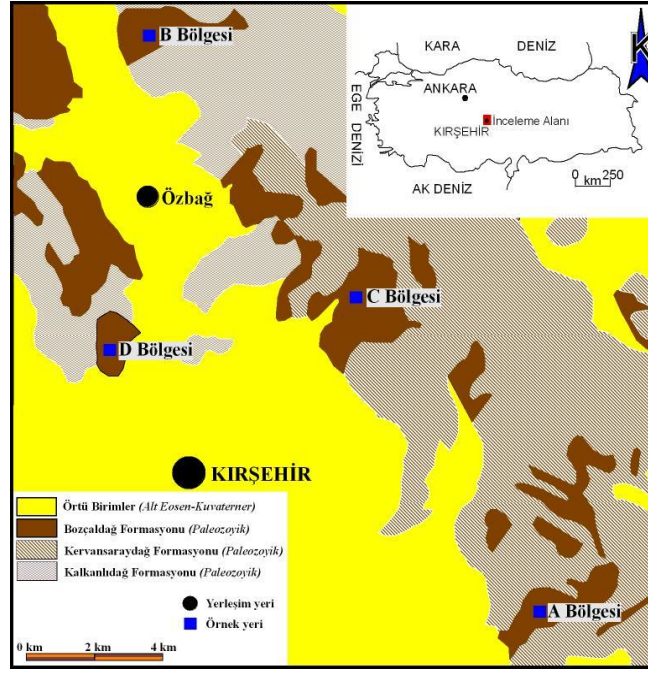
Agregaların çeşitli özellikleri betonun işlenebilirliğini, mukavemetini ve geçirimsizliğini önemli ölçüde etkilemektedir. İstenilen kalite de bir beton elde edebilmek için, beton üretiminde kullanılacak agregaların tane birim hacim ağırlığı, doluluk oranı (Kompasite), boşluk oranı (Porozite), tane dağılımı (Granülometri), aşınma dayanımı vb. özelliklerinin çok iyi incelenerek tespit edilmesi gereklidir (Beyazıt, 1988; Usta, 2012).

Kireçtaşları sahip oldukları yüksek dayanımları ve yoğunlukları, düşük poroziteleri (<%1) ile beton üretimi için iyi bir agrega kaynağıdır (West, 1996; McNally, 1998; Carlos vd., 2010, Elçi vd. 2014). Kireçtaşlarının beton agregası olarak tercih edilmesinin bir diğer nedeni de düşük termal genleşmeye sahip olmaları (French, 1991, Elçi vd. 2014) ve çimento hamuru ile iyi bir kimyasal bağ yapabilmeye özelliğidir (Akman, 1984; Baradan, 2004, Elçi vd. 2014). Ayrıca agrega yüzeylerinin pürüzlü olması da çimento hamuru ile agrega arasında kuvvetli bir aderans oluşturmasını sağlamaktadır (Demir, 2005).

Bu çalışma kapsamında Kırşehir bölgesinde üretimi gerçekleştirilen karbonat kökenli 4 farklı agrega ocağından temin edilen numunelerin agrega olarak kullanılabilirliği araştırılmış, aynı karışım oranlarında üretilen betonların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir.

2. Çalışma Alanı Jeolojisi

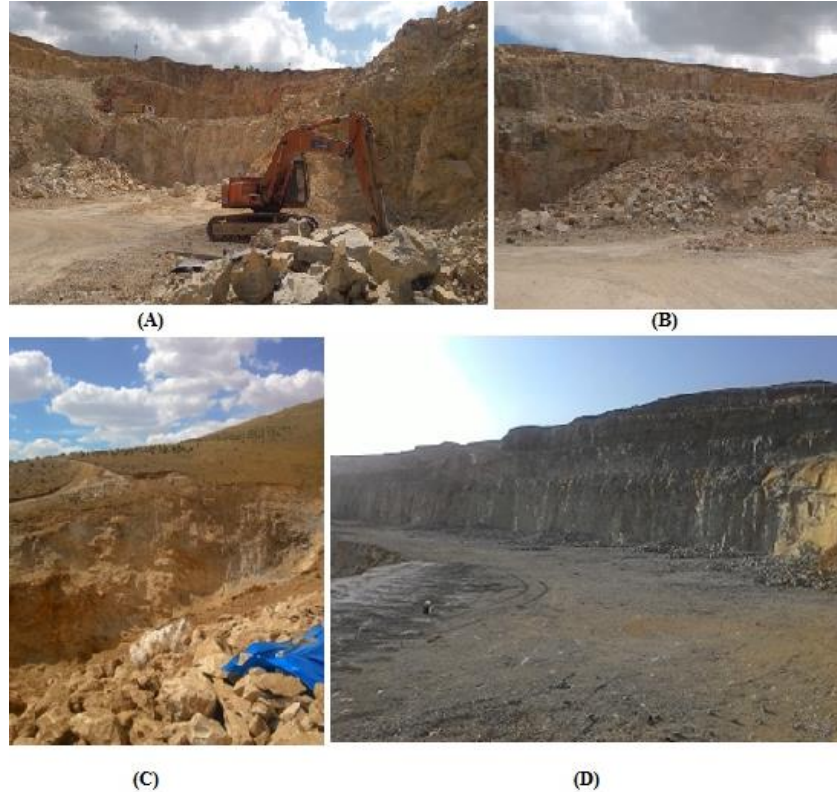
Bölgenin en yaşlı birimini Orta Anadolu metamorfikleri oluşturur. Orta Anadolu Metamorfikleri 3 formasyondan oluşur (Seymen 1981; Kara 1991). Bunlar yaşlıdan gence doğru, Kalkanlıdağ, Kervansaraydağ ve Bozçaldağ Formasyonlarıdır. Kalkanlıdağ Formasyonu, metamorfik temelin en yaşlı birimi olup, başlıca lökokrat ve daha yaygın mesokrat ve melenokrat gnayslar, biyotitlişistler, amfibollişist gibi görülen piroksenlişistler, yer yer rastlanabilen ince mermer bantları ve bunlara eşlik eden vollastonitli, diopsitli kalkışistler Kervansaraydağ Formasyonuna geçişte, kalsilikatiklişistler metakuvarsit ve kuvarslişistlerden oluşmaktadır. Kervansaraydağ Formasyonu, mermer ve kalkışist aralanmasından meydana gelmektedir. Kervansaraydağ Formasyonundaki şist ara düzeylerinin üste doğru giderek incelmeye ve seyrekleşmesiyle boyutları mm-cm hatta dm büyüklüğünde iri kristalli som mermerlerden oluşan Bozçaldağ Formasyonuna geçilir (Seymen, 1981). İnceleme alanı ve yakın çevresinde Orta Anadolu Metamorfikleri, Eosen – Kuvaterner yaşlı denizel ve karasal kaya birimleri tarafından örtülmektedir (Kara 1991). Çalışmada kullanılan agregalar Kırşehir bölgesindeki Bozçaldağ Formasyonu içerisindeki 4 farklı lokasyondan temin edilmiştir. İnceleme alanı ve yakın çevresinin jeoloji haritası Kara (1991) tarafından hazırlanan haritaların yeniden düzenlenmesiyle çizilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. İnceleme alanı jeoloji haritası

3. Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında Kırşehir bölgesinde bulunan hali hazırda beton üretimi amacıyla kullanımda olan karbonat kökenli üç farklı agrega ocağı işletmesi ve bir potansiyel saha olmak üzere 4 farklı bölgeden agrega temin edilmiştir. Temin edilen agregaların beton fiziksel ve mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Çalışmada öncelikli olarak arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 2'de 4 farklı bölgeden (A, B, C, D) temin edilen agrega ocaklarının görünümü verilmiştir.



Şekil 2. Agregaların temin edildiği ocaklarının görünümü

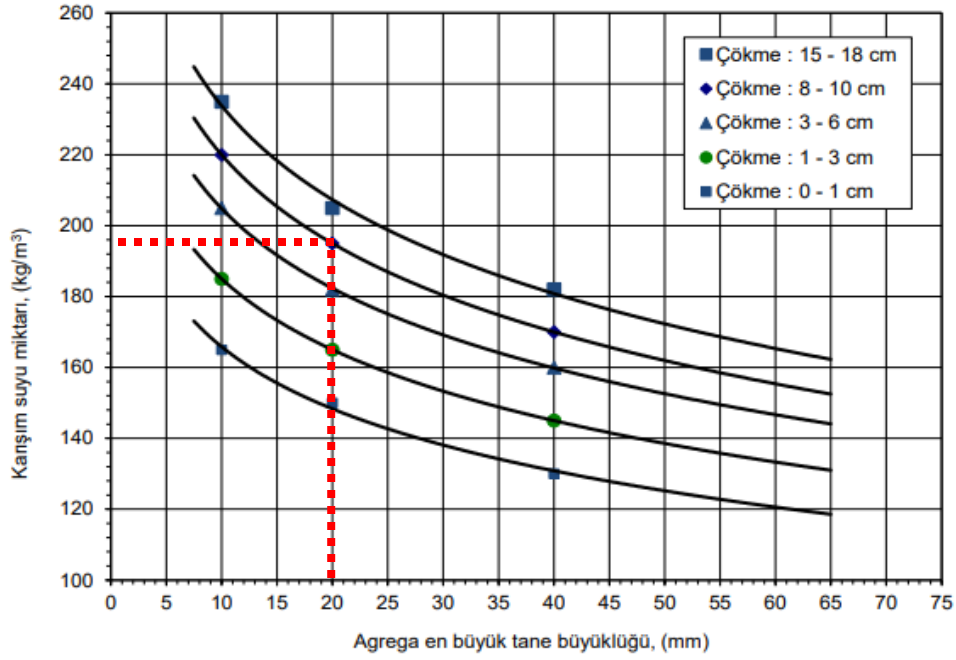
Temin edilen agregaların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Kaman Meslek Yüksekokulu Doğal Taş Analiz Laboratuvarı ve İnşaat Bölümü Beton Teknolojisi Laboratuvarlarında belirlenen elek aralıklarında agregalar sınıflandırılmış olup su emme, birim hacim ağırlık, özgül ağırlık, Los Angeles aşınma deneyleri yapılmıştır. Şekil 3'te sınıflandırılmış agregalar ve gerçekleştirilen deneylerin görünümü verilmiştir. Ayrıca Kütahya Üniversitesi İleri Teknoloji Merkezi (İLTEM) Laboratuvarında agregaların jeokimyasal özellikleri belirlenmiştir.



Şekil 3. Agregaların fiziksel özellik deneylerinden görünümü

Agregaların fiziksel özellikleri belirlendikten sonra beton karışım hesabı TS 802-2016 standardına göre dizayn edilmiştir. XF3 sınıfı genel olarak “Buz çözücü madde içermeyen suyla yüksek derecede doygun, yağmura ve donmaya maruz yatay beton yüzeyler” i kapsamaktadır. Bu araştırma için yatay plak halinde beton dökümü yapılmış; 7 günlük su küründe bekletilen plaklardan karot alımı yapılmıştır. Üretim sonrası numunelerin su küründe bekletilecek olması, yatay plak halinde beton dökümü yapıldıktan sonra karot alınacak olması sebebiyle XF3 çevresel etki sınıfı seçilmiştir. TS 802-2016 Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları’ ndaki sınırlar dikkate alınarak XF3 çevre etki sınıfı için beton sınıfı C25/30 ön görülerek hesaplamalar yapılmıştır (TS802-2016,2016).

Farklı bölgelerden agregalar dört farklı elek sınıfında (0-4,75, 4,75-10, 10-12,5, 12,5-20) temin edilmiştir. Hesaplamalar için $D_{max} = 20$ mm kullanılmıştır. Şekil 4’ten faydalanılarak 1 m^3 beton içerisindeki su miktarı 8-10 cm çökme değeri için 195 kg olarak bulunmuştur. Su/Çimento oranı 0,50 sabit olarak kabul edildiğinden 1 m^3 beton içerisindeki çimento miktarı $195/0,50 = 390 \text{ kg/ m}^3$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. Kırma taş agrega kullanılan farklı en büyük agrega tane büyüklüğü ve farklı beton çökme değerlerine sahip kimyasal katkısız ve hava sürüklenmiş betonun yaklaşık karışım suyu miktarları (TS 802-2016, 2016)

Aynı çimento dozajı ve su/çimento (%0,5 S/Ç) oranında 60x60x12 cm boyutlarında plaklar halinde betonlar dökülmüş ve vibratör kullanılarak sıkıştırılmıştır. Beton üretiminde CEM-I 42.5R tipi çimento kullanılmıştır. Beton plaklar dökümden sonra 7 gün plak halinde kür havuzunda +20 °C' de bekletilmiştir. Daha sonrasında karot makinesi ile karot alma işlemine geçilmiştir. Alınan karotlar 52 mm çapında olup yüksekliği de beton kesme makinesi ile 104 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. 7, 28 ve 90 günlük tek eksenli basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımları ve Schimdt sertlik değerlerinin belirlenebilmesi için karotlar su küründe bekletilmiştir. Şekil 5'te karot alımı sonrasında gerçekleştirilen deneylerin görünümü verilmiştir.



Şekil 5. Beton döküm işlemi sonrası karot alımı ve gerçekleştirilen deneylerin görünümü

4. Bulgular

4.1. Agregaların Kimyasal Analizleri

Çalışma kapsamında agregalar öncelikle KAEÜ Kaman Meslek Yüksekokulu Kaya Mekanığı Laboratuvarındaki çeneli kırıcıda kırılmış ve bilyalı değirmende öğütülerek kimyasal analiz boyutu olan 100 µm'nin altına indirilmiştir. Öğütülmüş numunenin kimyasal analizi Kütahya Dumlupınar Üniversitesi İLTEM Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. A ve B lokasyonlarındaki agregaların yüksek MgO değerleri dolomit minerali içeriğinden, D lokasyonundaki agregaların SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃, K₂O ve Na₂O değerleri mermerler içerisine bulaşan kalkıştı seviyelerindeki silikat minerallerinden kaynaklanmaktadır.

Tablo 1. Agregaların kimyasal analiz değerleri

Agrega bölgesi	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	LOI
A	32,22	20,72	0,79	0,47	0,07	<0,01	<0,01	<0,001	<0,001	45,24
B	45,94	8,35	0,35	0,61	0,08	<0,01	<0,01	0,04	<0,001	43,92
C	56,03	0,94	0,15	0,23	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	<0,001	41,86
D	51,66	0,68	2,61	2,01	1,04	0,46	0,19	0,02	0,06	40,71

4.2. Agregaların Fiziksel Özellikleri

Betonda kullanılan agregaların fiziksel özelliklerinden özgül ağırlık, görünür özgül ağırlık, su emme ve gerçek porozite değerleri ilgili standartlara göre belirlenmiştir (TS EN 1097-6, 2013). Araziden temin edilen agregaların fiziksel özelliklerini belirlemek için öncelikli sınıflandırma işlemi yapılmıştır. Sınıflandırma işleminde 0mm-4,75mm, 4,75mm-10mm, 10mm-12,5mm, 12,5mm-20mm elekler kullanılmıştır. Agregaların fiziksel özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Agregaların fiziksel özellikleri

Agrega bölgesi	Agrega boyutu (mm)	Özgül Ağırlık	Birim Hacim Ağırlık (gr/cm ³)	Su Emme (%)	Gerçek Porozite (%)
A	0-4,75	2,87	2,62	3,06	8,71
	4,75-10		2,63	2,84	8,33
	10-12,5		2,66	1,45	7,46
	12,5-20		2,68	1,16	6,59
B	0-4,75	2,81	2,59	2,94	7,83
	4,75-10		2,61	2,44	7,19
	10-12,5		2,62	2,04	6,62
	12,5-20		2,66	1,29	5,52
C	0-4,75	2,73	2,55	2,76	6,59
	4,75-10		2,57	2,09	5,79
	10-12,5		2,62	1,46	4,03
	12,5-20		2,66	0,86	2,67
D	0-4,75	2,76	2,58	2,67	6,52
	4,75-10		2,61	1,69	5,47
	10-12,5		2,63	1,30	4,57
	12,5-20		2,67	0,80	3,30

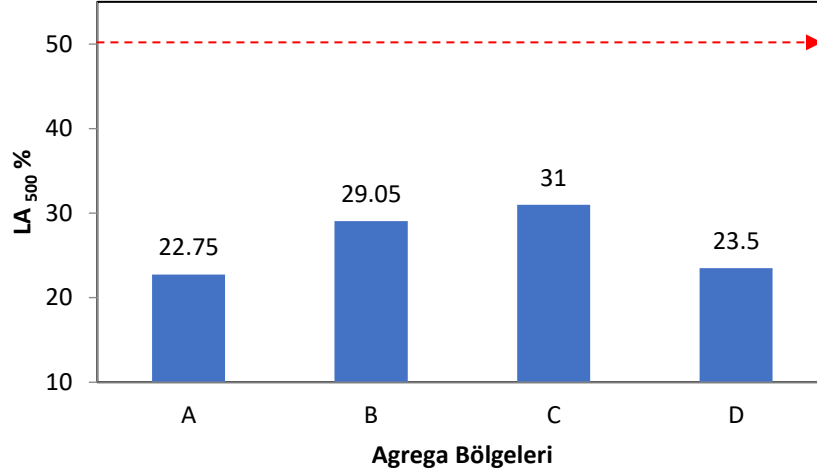
Tablo 2 incelendiğinde tüm bölgelerde tane boyu arttıkça su emme oranlarının azaldığı gözlenmiştir. İnce agregalar sınıfında su emme değerleri A, B, C, D bölgelerinde sırayla %3,06, %2,94, %2,76 ve %2,67 olarak belirlenmiştir. İri agregaların su emme oranları incelendiğinde her elek sınıfında en düşük su emme değeri D bölgesi agregalarındadır. İri agregaların su emme oranlarında en yüksek değer; 4,75mm-10mm elek açıklığında A bölgesi agregasında (%2,84), 10mm-12,5 mm ve 12,5mm-20mm elek açıklığında B bölgesi agregasında (sırasıyla %2,04 ve %1,29) tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalar kapsamında agregaların özgül ağırlıkları incelendiğinde A bölgesinde en yüksek (2,87); C bölgesinde ise en düşük (2,73) olduğu görülmüştür. Agregaların birim hacim ağırlıkları değerlerinde de benzer bir sıralama elde edilmiştir.

Çalışma kapsamında agregaların parçalanmaya karşı dayanımlarını belirlemek amacıyla Los Angeles aşınma deneyi TS EN 1097-2 standardına uygun olarak beton agregası için 500 devirde gerçekleştirilmiştir (TS EN 1097-2, 2020). Elde edilen veriler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Los Angeles Aşınma (LA₅₀₀) Deneysel Sonuçları

Agrega Bölgesi	LA ₅₀₀ , %
A	22,75
B	29,05
C	31,00
D	23,50

TS EN 1097-2 standardına göre agrega aşınma değerlerinin 500 devir için %50' yi geçmemesi istenmektedir. Los Angeles aşınma deneyi sonuçları incelendiğinde 4 farklı lokasyondan temin edilen tüm agregaların standarda uygunluk gösterdiği belirlenmiştir. Şekil 6'da agregaların LA₅₀₀ değerleri değişimi verilmiştir. Agregaların A bölgesinde dolomit, D bölgesinde ise silikat minerali içermesi nedeni ile A ve D bölgesindeki LA₅₀₀ değerleri B ve C bölgesindeki göre daha düşüktür.

**Şekil 6.** Agregaların LA₅₀₀ değerleri değişimi

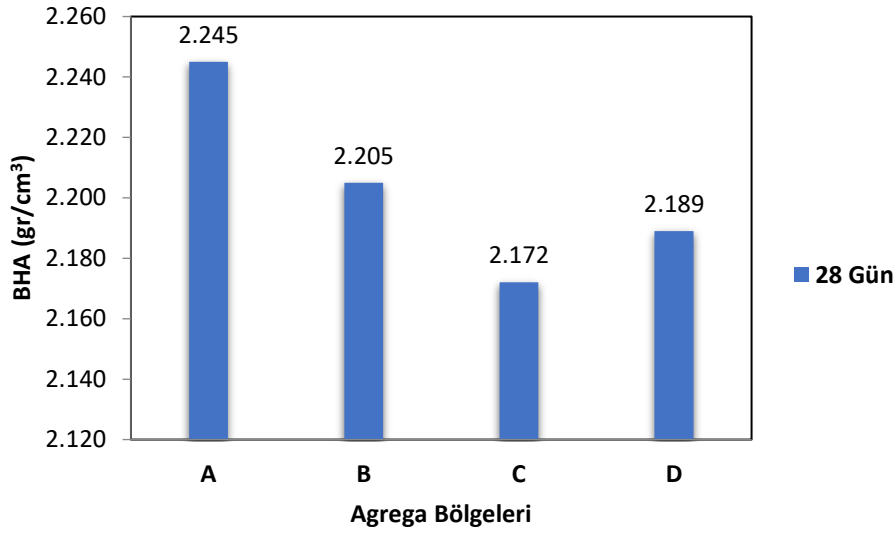
4.3. Betonların Fiziksel Özellikleri

28 günlük kür süresi sonunda beton karot örneklerinin birim hacim ağırlık ve ultrasonik ses dalgası yayılma hızı tayini gibi fiziksel özellikleri ilgili standartlara (TS EN 12390-7, 2019; TS EN 12504-4, 2012) göre belirlenmiştir. Tablo 4'te birim hacim ağırlık değerleri (BHA) verilmiştir.

Tablo 4. 28 günlük kür süresinde beton birim hacim ağırlık (BHA) değerleri

Agrega bölgesi	BHA (gr/cm ³)
A	2,245
B	2,205
C	2,172
D	2,189

4 farklı bölge agregasından üretilen betonlara ait birim hacim ağırlık verileri incelendiğinde en yüksek değer A bölgesinde en düşük değer ise C bölgesinde elde edilmiştir. Şekil 7'de farklı bölgelerden temin edilen agregalarla üretilen beton örneklerine ait 28 günlük birim hacim ağırlık değerleri verilmiştir.



Şekil 7. Agregaların 28 günlük BHA değerleri değişimi

Ultrasonik ses dalgası yayılma hızı, beton için tahribatsız deney türlerinden biri olarak bilinmektedir. Beton numunesine gönderilen ses dalgalarının, iletim hızına göre betonun yoğunluğu, sertliği, porozitesi, bağ kuvveti ve dolayısıyla dayanımı hakkında bilgi vermektedir (Gürsel ve Erenson, 2017). Çalışma kapsamında dört farklı bölgeden temin edilen agregalar kullanılarak aynı şartlarda üretilen betonların kalitesinin belirlenmesi amacıyla 28 günlük kür süresi sonunda belirlenen ultrasonik ses dalgası yayılma hızı (V_p) (km/s) değerleri Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5. Ultrasonik ses dalgası yayılma hızı (V_p) ölçüm değerleri

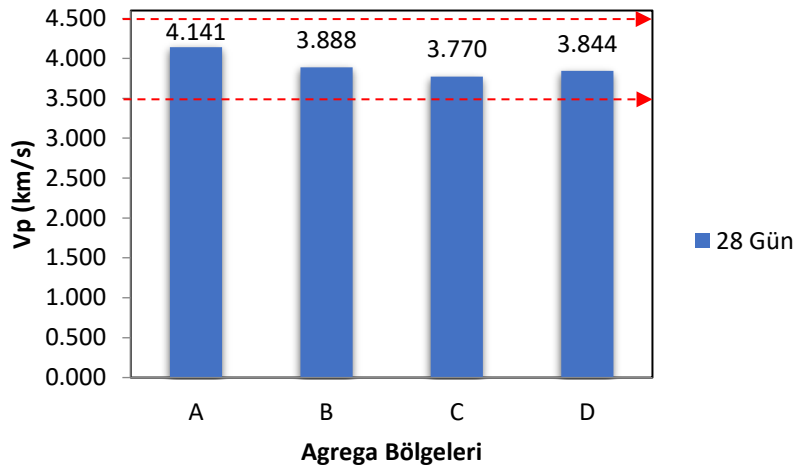
Agrega bölgesi	V_p (km/s)
A	4,14
B	3,89
C	3,77
D	3,84

28 günlük kür süresinde elde edilen ultra ses değerleri incelendiğinde 3,77 ile 4,14 km/s değerleri arasında değiştiği gözlenmekte olup $A > C > B > D$ bölgesi olarak sıralanmışlardır. Erdoğan (2003)’e göre beton kalitelerinin iyi sınıfında oldukları belirlenmiştir (Tablo 6).

Tablo 6. Ultrasonik ses dalgası yayılma hızı ile beton kalitesi tayini (Erdoğan, 2003)

Ultrasonik ses (V_p) km/s	Beton kalitesi
>4,5	Mükemmel
3,5-4,5	İyi
3-3,5	Şüpheli
2-3	Zayıf
<2	Çok zayıf

Şekil 8’de 4 farklı bölgelerden temin edilen agregalarla üretilen beton örneklerine ait 28 günlük ultrasonik ses dalgası yayılma hızı değerleri değişimleri verilmiştir.



Şekil 8. Beton örneklerinin 28 günlük ultrasonik ses dalgası yayılma hızı değerleri değişimi

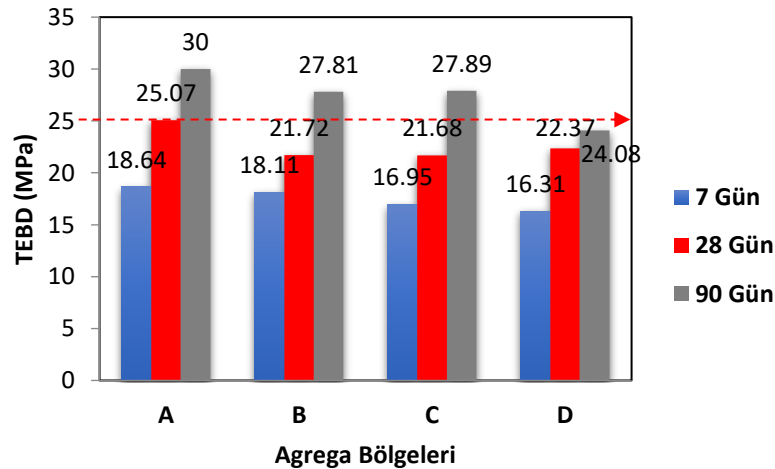
4.4. Betonların Mekanik Özellikleri

Çalışma kapsamında 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri sonunda beton örneklerinin mekanik özelliklerinden tek eksenli basınç dayanımı TS EN 12390-3, yarmada çekme dayanımı TS EN 12390-6 ve Schmidt sertlik değerleri TS EN 12504-2 standartlarına göre belirlenmiştir (TS EN 12390-3,2019; TS EN 12390-6, 2010; TS EN 12504-2, 2013) Karot l/d oranı (104mm/52mm=2) olarak alınmış; ASTM C42' ye göre farklı boy/çap oranları karot numuneleri için düzeltme katsayısı 1.00'a göre basınç dayanımı değerleri alınmıştır (ASTM C42, 2020). Bu değerler Tablo 7' de gösterilmiştir.

Örneklerin tek eksenli basınç dayanımları (TEBD) incelendiğinde (Tablo 7) tüm agrega bölgelerinde beton kür süresi arttıkça dayanımın da arttığı görülmüştür (Şekil 9). 7, 28 ve 90 günlük beton kür süresinde en yüksek basınç dayanımını A bölgesi agregası ile üretilen beton örneklerinde (18,64 MPa, 25,07 MPa ve 30,00 MPa) görülmüştür. Çalışmada 28 günlük kür süresi sonrasında A bölgesinden temin edilen agregaların C25/30 beton standardına ulaştığı gözlenirken B ve C bölgelerinin ise standart değere 90 günlük kür süresi sonrasında ulaştığı belirlenmiştir. Standartlarda belirtilen değerlere ulaşılması hususunda B, C, D bölgesi agregaları ile farklı su/çimento oranlarında veya farklı doğal katkıları ile ayrıca çalışmalar yapılabilir.

Tablo 7. Tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) değerleri

Agrega bölgesi	TEBD (MPa)		
	Kür süreleri		
	7 Gün	28 gün	90 gün
A	18,64	25,07	30
B	18,11	21,72	27,81
C	16,95	21,68	27,89
D	16,31	22,37	24,08

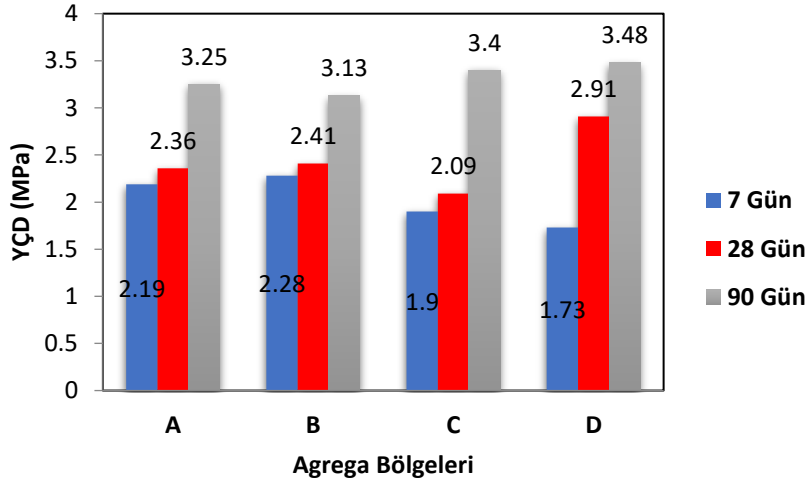


Şekil 9. Beton örneklerinin, 7, 28 ve 90 günlük TEBD değerleri değişimi

Çekme dayanımı, betonda çekme etkisi oluşturacak kuvvetlerin neden olabileceği şekil değiştirmelere ve kırılmalara karşı betonun gösterebildiği direnme kabiliyeti olarak bilinmektedir. Tablo 8’de verilen yarmada çekme dayanımı (YÇD) değerleri incelendiğinde 28 günlük kür süresi sonunda en yüksek YÇD değerinin D bölgesi agregası ile üretilen beton örneğinden (2,91 MPa) en düşük YÇD değerinin ise C bölgesi agregasından üretilen betondan (2,09 MPa) örneğinden elde edildiği görülmektedir. Şekil 10’da beton örneklerinin, 7, 28 ve 90 günlük YÇD değerleri değişimi verilmiştir.

Tablo 8. Yarmada çekme dayanımı (YÇD) (MPa) değerleri

Agrega bölgesi	YÇD (MPa)		
	Kür süreleri		
	7 Gün	28 gün	90 gün
A	2,19	2,36	3,25
B	2,28	2,41	3,13
C	1,90	2,09	3,40
D	1,73	2,91	3,48



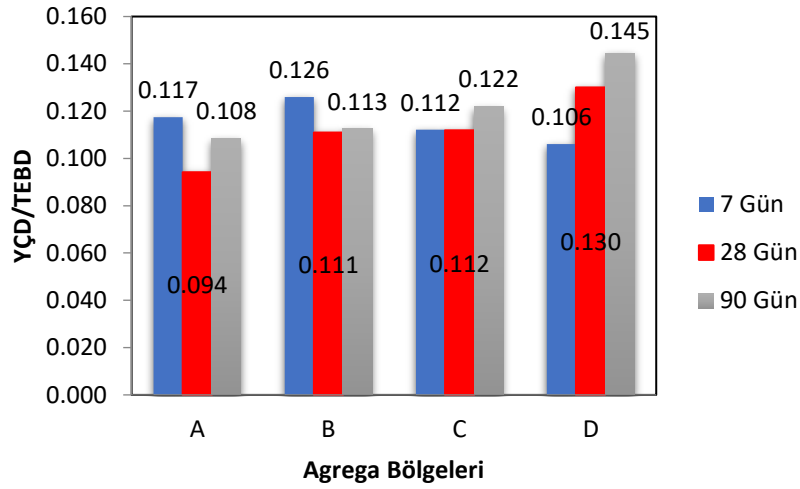
Şekil 10. Beton örneklerinin, 7, 28 ve 90 günlük YÇD değerleri değişimi

Basınç dayanımı betonun en önemli özelliklerin başında gelmektedir. Yapıların tasarım hesaplarında genellikle kullanılmakta olan dayanım türü, betonun basınç dayanımıdır. Ancak, oldukça gevrek bir malzeme olan betonun çekme kuvvetlerine karşı direnme kabiliyeti çok düşük olduğundan, çekme dayanımının değeri betonun içerisindeki çatlakların oluşmasında önemli rol oynamaktadır. Genellikle, yapıdaki betona doğrudan çekme kuvveti uygulanmamaktadır. Fakat beton elemanların üzerlerine gelen basınç ve eğilme kuvvetleri betonun üzerinde dolaylı olarak çekme kuvvetlerinin oluşmasına sebebiyet vermektedir (Gürsel ve Erenson, 2017).

Çekme/basınç dayanımı oranı malzemenin yük altındaki gevreklik ölçütünü ortaya koymaktadır. Gevrek malzemede bu oran küçülürken, sünek davranışta ise büyümektedir (Arioğlu vd. 2002). Tek eksenli basınç dayanımı kür süresine bağlı olarak artış gösterdiğinde YÇD/TEBD oranı azalmaktadır. Agregatürü, agregat özellikleri, kür süresi, ortalama tane boyutu YÇD/TEBD oranını etkileyen belli başlı faktörlerdir. YÇD/TEBD oranı küçüldükçe beton ‘gevrek’ hale gelirken; YÇD/TEBD oranı büyüdükçe beton ‘sünek’ yapıda olmaktadır. Tablo 9’da YÇD/TEBD oranları incelendiğinde en gevrek beton örneğinin 28 günlük A bölgesi betonu (0,094) olduğu görülmektedir. 28 günlük beton basınç dayanımlarında en yüksek değeri veren yine bu örnektir. Dolayısıyla basınç dayanımı artışı ile gevreklik arasındaki ilişkiyi doğrulamıştır. YÇD/TEBD oranları incelendiğinde en sünek beton örneğinin 90 günlük D bölgesi betonu (0,145) olduğu belirlenmiştir. 90 günlük beton basınç dayanımında da en düşük dayanım değeri yine bu örnekte tespit edilmiştir. Bu örnekte de basınç dayanımı ve süneklik arasındaki ilişki doğrulanmıştır. Şekil 11’de beton örneklerinin, 7, 28 ve 90 günlük YÇD/TEBD değerlerinin değişimi verilmiştir.

Tablo 9. Beton örneklerinin, 7, 28 ve 90 günlük YÇD/BD değerleri

Agrega bölgesi	YÇD/TEBD		
	Kür süreleri		
	7 Gün	28 gün	90 gün
A	0,117	0,094	0,108
B	0,126	0,111	0,113
C	0,112	0,112	0,122
D	0,106	0,130	0,145



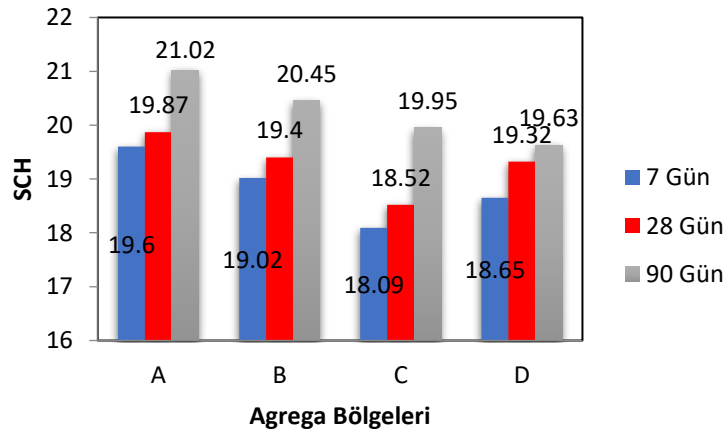
Şekil 11. Beton örneklerinin, 7, 28 ve 90 günlük YÇD/TEBD değerleri değişimi

Schmidt geri sıçrama sertlik değerleri numunenin su içeriği, yüzey pürüzlülüğü, betonun homojenliği (agregaların beton içerisindeki dağılımı, çekiç temasının çimento veya agregaya gelmesi) ve benzeri birçok faktörün etkisi altındadır (Güçlüer vd. 2017). Standartlarda “geri sıçrama” testi olarak bilinen, uygulanmasında “Schmidt çekici” kullanılan deneyin, betonun sertliği ve buna bağlı olarak betonu oluşturan kristallerin bağ kuvvetleri hakkında çok kesin sonuçlar olmasa da bilgi verdiği standartlarda belirtilmiştir (TS EN 12504-2). Çalışma kapsamında 4 farklı bölgeden temin edilen agregaların aynı şartlar altında üretilen betonların yüzey sertlikleri üzerine etkilerinin belirlenmesi amacıyla Schmidt darbe çekici ile yüzey sertlik okumaları gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri betonların tek eksenli basınç dayanımlarının belirlenmesinde kullanılan numuneler üzerinde belirlenmiş olup sonrasında dayanım testleri gerçekleştirilmiştir. Schmidt darbe çekici ölçümleri sonucunda elde edilen veriler Tablo 10’da verilmiştir.

Tablo 10. Schmidt darbe çekici (SCH) ölçümleri

Agrega bölgesi	SCH Değerleri		
	Kür süreleri		
	7 Gün	28 gün	90 gün
A	19,6	19,87	21,02
B	19,02	19,40	20,45
C	18,09	18,52	19,95
D	18,65	19,32	19,63

Ölçümler sonucunda birbirine yakın sertlik değerleri olmakla beraber 28 günlük numunelerden en yüksek sertlik değerinin A bölgesinde (19,87) en düşük ise C bölgesinde (18,52) olduğu belirlenmiştir. Şekil 12’de beton örneklerinin, 7, 28 ve 90 günlük SCH değerleri değişimi verilmiştir.



Şekil 12. Beton örneklerinin, 7, 28 ve 90 günlük SCH değerleri değişimi

5. Sonuçlar ve Öneriler

Türkiye deprem kuşağında olan bir ülkedir. Binaların sağlam ve uzun ömürlü olmalarında kullanılan beton malzemelerinin kalitesi önemli rol oynamaktadır. Özellikle betonun %70-80'lik içeriğini oluşturan agregaların doğru seçilmesi beton kalitesi açısından önemli bir husustur. Öz kaynakların verimli bir şekilde değerlendirilmesi noktasında beton içerisinde kullanılması planlanan agreganın özellikleri belirlenmeli ve bu özellikler neticesinde kullanım alanı ortaya konmalıdır. Bu çalışma kapsamında Bozçaldağ Formasyonunda yer alan 4 farklı bölgeden temin edilen mermerlerin agregası olarak kullanılabilirliği araştırılmış olup aynı şartlar ve karışım oranlarında üretilen betonların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu çalışma ile beton üreticilerine agregası seçiminin önemi vurgulanmaya çalışılmıştır.

Araştırma kapsamında elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Çalışmada kullanılan agregalardan en yüksek özgül ağırlığa sahip olan A bölgesi agregası ile üretilen betonların dayanımları 7, 28 ve 90 günlük kür sonunda tek eksenli basınç dayanımları sırasıyla 18,64 MPa, 25,07 MPa, 30,00 MPa olarak elde edilmiş olup diğer bölgelere göre yüksektir. Dört farklı bölgeden alınan agregalarla elde edilen betonların 28 gün sonundaki karakteristik basınç dayanımları (f_{ck}) incelendiğinde basınç dayanımının %10 düşük olma koşulunu sadece A bölgesi agregası ile üretilen betonun sağladığı; diğer üç bölge agregası ile üretilen betonun bu koşulu sağlamadığı görülmüştür. B ve C bölgelerindeki agregalar ile üretilen beton numunelerinin 90 günlük kür sonrası basınç dayanımları incelendiğinde C25/30 basınç dayanımını tüm bölgelerin sağladığı ve D Bölgesinde agregasında standart değere yakın (24,08 MPa) olduğu görülmektedir. D bölgesi agregalarıyla üretilen betonda; farklı S/Ç oranı, iri-ince agregası oranı, doğal ve yapay katkı beton karışımları ile deneme çalışmaları yapılarak standartta öngörülen değerlere ulaşılabilir.
- 90 günlük kür süresi sonrası elde edilen basınç dayanımı değerlerinde 28 günlük kür süresi verilerine göre artış gözlenmiştir. Bu durum hidrasyonun devam ettiğinin bir göstergesidir.
- Ultrasonik ses dalgası yayılma hızı değerleri incelendiğinde 28 günlük kür süresi sonrasında A bölgesi agregası ile üretilen betonların en iyi sonucu verdiği (4,14 km/s) görülmektedir.
- Agregası aşınma değerleri incelendiğinde tüm agregası bölgelerine ait agregaların TS EN 706 12620+A1 standardını sağladığı belirlenmiştir. Elde edilen verilere göre aşınmaya en dayanıklı agregası A bölgesinde bulunmaktadır.
- Beton numunelerinde en yüksek çekme dayanımı değeri 7 günlük kür süresi sonunda B bölgesi agregası ile üretilen beton numunesinden (2,28 MPa), 28 ve 90 günlük kür süresi sonunda D bölgesi agregası ile üretilen beton numunesinden (2,91 MPa ve 3,48 MPa) elde edilmiştir. Tüm kür sürelerine bakıldığında çekme dayanımının kür süresi arttıkça arttığı gözlemlenmiştir.
- Yarımadamda çekme dayanımı (YÇD) değerleri incelendiğinde en yüksek YÇD değerinin 28 ve 90 günlük kür süresi sonunda D bölgesi agregası ile üretilen beton örneğinden (2,91-3,48 MPa) elde edildiği görülmüştür.
- YÇD/TEBD oranları incelendiğinde en gevrek beton örneğinin 28 günlük A bölgesi betonu (0,094) olduğu görülmektedir. 28 günlük beton basınç dayanımlarında en yüksek değeri veren yine bu örnektir. Dolayısıyla basınç dayanımı artışı ile gevreklik arasındaki ilişkiyi doğrulamıştır. YÇD/TEBD oranları incelendiğinde en sünek beton örneğinin 90 günlük D bölgesi betonu (0,145) olduğu belirlenmiştir. 90 günlük beton basınç dayanımında da en düşük dayanım değeri yine bu örnekte tespit edilmiştir. Bu örnekte de basınç dayanımı ve süneklik arasındaki ilişki doğrulanmıştır.
- Schmidt darbe çekici ölçümleri sonucunda birbirine yakın sertlik değerleri olmakla beraber 28 günlük numunelerden en yüksek sertlik değerinin A bölgesinde (19,87) en düşük ise C bölgesinde (18,52) olduğu belirlenmiştir.

Çalışmada kullanılan agregalar aynı formasyonun 4 farklı bölgesinden alınmış olmasına rağmen farklı fiziksel ve jeokimyasal özelliklere sahiptir. A bölgesindeki agregalarda MgO oranı %20,72 olup diğer bölgelere göre daha az kalsit minerali ve daha fazla dolomit minerali içermektedir. A bölgesi agregalarından üretilen betonun ultrasonik ses dalgası, tek eksenli basınç dayanımı ve Schmidt sertlik değerlerinin diğer bölgelere göre yüksek olmasının nedeni içerisindeki dolomit minerali miktarının yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Agregası olarak kullanılacak malzemenin aynı formasyon içerisinde olsa bile farklı mineralojik ve jeokimyasal içerik gösterebileceği göz ardı edilmemelidir. Bunun sonucunda agreganın, betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine doğrudan etkisi olduğu bu çalışma ile de görülmüştür. Bu nedenle beton üretiminde istenen standardizasyonun sağlanması açısından taş ocaklarından elde edilen kırma taş agregası özelliklerinin belirli periyotlar halinde TS EN 1097-2, TS EN 1097-6, TS 706 EN 12620+A1 standartlar çerçevesinde izlenmesi önem arz etmektedir.

Referanslar

Akman, S. M. (1978). Dolomit kökenli beton agregalarında alkali-reaktivitesi olasılığı. İTÜ Dergisi, 36 (3), 55-59

Arioğlu, E., Girgin, C., & Arıoğlu, N. (2002). Betonda çekme/basınç dayanımı oranının irdelenmesi. Hazır Beton dergisi. Ocak-Şubat, 58-63

- ASTM C42/42M-20, (2020). Standard test method of obtaining and tested drilled cores and sawed beams of concrete, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, United States of America.
- Baradan, B. (2004). Yapı Malzemesi II. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Yayın No. 207.
- Beyazıt, Ö.L. (1988). "Beton ve Deneyleri", Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.
- Carlos, A., Masumu, I., Hiroaki, M., Maki, M., & Takahisa, O., (2010). The effects of limestone aggregate on concrete properties. *Construction and Building Materials*, 24, 2363-2368
- Demir, İ. (2005). Kırşehir yöresi kayaçlarının kırmataş agrega olarak kullanılabilirlik özellikleri. *Politeknik Dergisi*, 8(1), 111-121
- Elçi, H., Türk, N., & İştetek, İ. (2014). İzmir Karaburun yarımadasındaki farklı kireçtaşlarının beton agregası olarak değerlendirilmesi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 38(2), 103-134
- Erdoğan, T. Y. (2003). Beton, M. E. T. U. Press Publishing Company.
- French, W. J. (1991). Concrete Petrography: a review. *Quarterly Journal Engineering Geology*, 24, 17-48.
- Güçlüer, K., Günaydın, O., Tekin, Ö. F., & Şahan, M. F. (2017). Farklı tipte agrega kullanımının betonun mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), 107-114
- Güner, M.S., & Süme, V. (2001). Yapı Malzemesi ve Beton", İstanbul, Aktif Yayınevi, 336 s.
- Gürsel, E., & Erenson, C. (2017). Agrega türü ve mekanik özelliklerinin yüksek dayanımlı betonların mekanik özellikleri üzerindeki etkisi, *Hazır Beton Kongresi*, İstanbul.
- Kara, H. (1991). 1:100.000 ölçekli açınsama nitelikli Türkiye jeoloji Haritaları serisi, Kırşehir-J32 paftası. MTA yayınları.
- McNally, G.H. (1998). *Soil and Rock Construction Materials*, E & FN Spon, London, 403 p.
- Seymen, İ. (1981). Kaman (Kırşehir) dolayında Kırşehir masifinin stratigrafisi ve metamorfizması. *TJK Bült.* 24, 2, 101-108. (in Turkish).
- Tekin, İ., Kotan, T., Yurdakul, M. & Öner, E. (2017). Bayburt bölgesinde bulunan farklı agrega tipleri ile üretilen geleneksel betonların mekanik mukavemetleri üzerine bir çalışma. *Politeknik Dergisi* 20.3
- TS EN 1097-2. (2020). Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 2: Parçalanma Direncinin Tayini için Metotlar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-6. (2013). Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3. (2019). Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri– Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Necati Bey Caddesi, 112, Ankara.
- TS EN 12390-6. (2010). Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri– Bölüm 6: Deney Numunelerinin Yarmada Çekme Dayanımı Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Necati Bey Caddesi, 112, Ankara.
- TS EN 12390-7. (2019). Beton deneyleri- Bölüm 7: Sertleşmiş betonun yoğunluğunun tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Necati Bey Caddesi, 112, Ankara.
- TS EN 12504-2. (2013). Yapılarda beton deneyleri- Bölüm 2: Tahribatsız muayene- Geri sıçrama sayısının belirlenmesi. Türk Standartları Enstitüsü, Necati Bey Caddesi, 112, Ankara.
- TS EN 12504-4. (2012). Beton deneyleri- Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Necati Bey Caddesi, 112, Ankara.
- TS 706 EN 12620+A1. (2009). Beton Agregaları. Türk Standartları Enstitüsü, Necati Bey Caddesi, 112, Ankara
- TS 802-2016 (2016) Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları. Türk Standartları Enstitüsü, Necati Bey Caddesi, 112, Ankara.

Usta, S. (2012). Agregada granölometrisinin beton bileşimindeki teorik malzeme miktarları ile betonun kompasite ve porozite değerleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Cilt:8, No:1,1-15s.

West, G. (1996). *Alkali-aggregate reaction in concrete roads and bridges*. Thomas Telford, London 163 p.



Atık Malzeme İçeren Polimer Bazlı Kompozitlerin Isıl İletkenlik Özelliklerinin İncelenmesi

Investigation of Thermal Conductivity Properties of Polymer Based Composites Containing Waste Materials

Mehmet Nuri Kolak¹ , Meral Oltulu² 

¹Bingöl Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, İnşaat Teknolojisi Programı, 12000 Bingöl, TÜRKİYE

²Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 25240 Erzurum, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 06/11/2020

Kabul / Accepted: 18/01/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 29/01/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Mineral yünlerden (taş yünü, cam yünü) oluşan yalıtım malzemesi üretimi esnasında, doğal kaynak tüketimi ve yüksek enerji maliyetleri ortaya çıkmaktadır. Doğal kaynak tüketimini azaltmak için alternatif yalıtım ürünlerine ihtiyaç bulunmaktadır. Bu kapsamda, kullanım ömrünü tamamlamış ve atık konumundaki mineral yün (taş yünü, cam yünü), tarımsal atık olan ceviz kabuğu ve endüstriyel atık olan MDF tozu kullanılarak polyester reçineli kompozit malzemeler üretilmiştir. Polimer matris ağırlığının %10'u oranında belirlenen atık malzemeler (taş yünü, cam yünü, ceviz kabuğu ve MDF tozu) polimerle ikame edilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin birim hacim ağırlığı, ultrases geçiş hızı ve ısı iletkenlik değerleri incelenmiştir.

Yapılan deneylerde, ceviz kabuğu takviyeli numunenin ısı iletkenlik değerinin, kontrol numunesine göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. MDF tozu takviyeli kompozitin ısı iletkenlik değerinin kontrol numunesinden kısmen daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Taş yünü ve cam yünü katkılı kompozitlerde kısmen çökme gözlenmiştir. Isıl iletkenlik değeri kontrol numunesine göre yüksek çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Isıl iletkenlik, polimer kompozit, taş yünü, cam yünü, ceviz, MDF tozu”

Abstract

Natural resource consumption and high energy costs occur during the production of insulation materials made of mineral wools (e.g. rock wool, glass wool). Alternative insulation products are needed to reduce the consumption of natural resources. In this scope, composite materials with polyester resin were produced by using mineral wool (rock wool, glass wool), which is a waste, walnut shell, which is agricultural waste, and MDF powder, which is industrial waste. Waste materials (e.g. rock wool, glass wool, walnut shell and MDF powder) determined at the rate of 10% of the polymer matrix weight were replaced with polymer. Unit volume weight, ultrasound transmission velocity and thermal conductivity values of the produced composite materials were examined.

In the experiments, it was determined that the thermal conductivity value of the walnut shell reinforced sample was higher than the control sample. It was determined that the thermal conductivity value of the MDF powder reinforced composite was slightly lower than the control sample. The rock wool and glass wool-reinforced composites partial collapse was observed. Thermal conductivity value is higher than the control sample.

Key Words

“Thermal conductivity, polymer composite, rock wool, glass wool, walnut, MDF powder”

1. Giriş

Isıtma ve soğutma maliyetlerinin yüksek olması, doğal kaynak tüketimi ve atık bertaraf maliyetleri nedeniyle uygun yalıtım malzemesi kullanımı ve uygulamaları sık araştırılan konulardandır. Yalıtım ürünlerinde seri üretim çalışmaları 20. yüzyılın başlarında Almanya'da başlamıştır. 20. yüzyılın ilk yıllarından itibaren giderek kullanımı artan yalıtım uygulamaları 1990 yılı ve sonrasında enerji verimliliği uygulamalarının artmasına paralel olarak daha yaygınlaşmıştır (Binici vd., 2014).

Günümüzde kullanılan geleneksel mineral yün kaynaklı yalıtım uygulamaları her ne kadar iyi yalıtım değerleri sağlasa da doğal kaynak tüketimi nedeniyle araştırmacılar, alternatif uygulanabilir yalıtım uygulamalarına yönelmiştir. Bu bağlamda organik atıkların yalıtım malzemesi olarak kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır (Binici vd., 2014). Bu çalışmalar incelendiğinde bio-kompozit olarak adlandırabileceğimiz atık ürünlerin (mısır koçanı, ayçiçeği sapı, pirinç kabuğu, hurma çekirdeği, Jüt, kenevir, ağaç kabukları, buğday kabuğu, odun lifleri, muz, ananas vb.) kullanıldığı görülmektedir (Abu-Jdayil, Hittini, vd., 2019; Abu-Jdayil, Mourad, vd., 2019; Ahmad vd., 2014; Alsewailem & Binkhder, 2010; De Albuquerque vd., 2000; De Farias vd., 2009; Devireddy & Biswas, 2016; Dhakal vd., 2007; Muthukumar vd., 2020; Mwaikambo & Bisanda, 1999; Patnaik & Nayak, 2018; Reddy vd., 2018; Satyanarayana vd., 1983; Subba Raju vd., 2018). Bu ürünlerin kullanımı neticesinde tarımsal atıkların çevreye vereceği zarar en aza indirilmiş ve ekonomiye kazandırılmış olacaktır.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde daha çok doğal liflerle güçlendirilmiş polimer kompozit ürünler üzerinde çalışmalar görülmektedir (Abu-Jdayil, Mourad, vd., 2019). Doğal lifli polimer kompozitlerle yapılan çalışmalarda polimer olarak epoksinin kullanıldığı; epoksi-mısır koçanı (Binici vd., 2014), epoksi-jüt (Ahmad vd., 2014; Devireddy & Biswas, 2016; Patnaik & Nayak, 2018), epoksi-cam elyaf (Aygün, 2020) ve polyesterin kullanıldığı; polyester-hurma çekirdeği (Alsewailem & Binkhder, 2010; Abu-Jdayil, Hittini, vd., 2019), polyester-jüt (De Albuquerque vd., 2000; Reddy vd., 2018; Subba Raju vd., 2018), polyester-muz-pamuk (Satyanarayana vd., 1983), polyester-şeftali palmyesi (De Farias vd., 2009), polyester-kenevir (Dhakal vd., 2007; Subba Raju vd., 2018) ve polyester-pamuk-kapok (Mwaikambo & Bisanda, 1999) mevcuttur. Farklı polimer matris ürünlerine bağlı olarak literatürde yapılan çalışmaların detayları Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Farklı polimer matris ürünleri kullanılarak üretilen kompozitlerin kullanım oranlarına bağlı olarak ısı iletkenlik değerleri

Yazar	Kullanılan Malzeme	Malzeme türü (Toz /Lif)	Faz Malzeme Kullanım oranları	Isıl iletkenlik değerleri (W/mK)
Ahmad vd., (2014)	Epoksi-jüt	Lif	%5,10,15,20,25,30,35 (ağırlıkça)	---
Devireddy & Biswas, (2016)	Epoksi-muz, jüt	Lif	Muz:%0-30, Jüt:%0-30 (ağırlıkça)	0,130-0,230
Patnaik & Nayak, (2018)	Epoksi-silikon karbür, jüt	Lif	jüt:%40, silikon karbür: %0,5,10,15 (ağırlıkça)	0,255-0,292
Aygün, (2020)	Epoksi-cam elyaf	Lif	%5, 10, 15 (ağırlıkça)	0,166-0,199
Binici vd., (2014)	Epoksi-mısır koçanı	Lif	%67, %57 (ağırlıkça)	0,075-0,098
Subba Raju vd., (2018)	Polyester-jüt, cam elyaf, kenevir	Lif	%18,24,30,36 (hacimce)	0,230-0,190
Reddy vd., (2018)	Polyester-jüt, ananas yaprağı, cam elyaf	Lif	%18-42 (hacimce)	0,230-0,181
De Albuquerque vd., (2000)	Polyester-jüt	Lif	%0,10, 20, 30 (hacimce)	---
De Farias vd., (2009)	Polyester-şeftali palmyesi	Lif, Toz	%10 (ağırlıkça)	---
Satyanarayana vd., (1983)	Polyester-muz, pamuk	Lif	%9, 14, 18 (ağırlıkça)	---
Dhakal vd., (2007)	Polyester-kenevir	Lif	%0, 10, 15, 21, 26 (hacimce)	---
Özel vd., (2015)	Polyester-Mineral (CEN kumu)	İnce agrega	%0, 30, 60 (hacimce)	0,090-0,250
Özel vd., (2015)	Polyester-polipropilen lif	Lif	%0, 4.5, 9 (hacimce)	0,090 -0,130
Alsewailem & Binkhder, (2010)	Polistren-hurma çekirdeği tozu	Toz	%0, 5, 10, 20, 30, 40 (ağırlıkça)	---
Abu-Jdayil, vd., (2019)	Polistren-hurma çekirdeği tozu	Toz	%0, 10, 20, 30, 40,50 (ağırlıkça)	0,052-0,056

(---): bilgi yok

Tarımsal atık konusunda ülkemizdeki mevcut miktarlar bu tip çalışmalar yapılması açısından büyük önem taşımaktadır. Türkiye’de üretilen sert kabuklu meyve ürünlerinden bazılarının 2015-2019 yılları arasındaki üretim ve atık miktarları Tablo 2’te gösterilmiştir.

Tablo 2. Türkiye’deki sert kabuklu meyve üretim ve atık kabuk miktarları (Akçay & Tosun, 2005; Balık vd., 2015; Çetinkaya, 2016; Kalkancı, 2013; TÜİK, 2020; Yaman, 2012)

Ürün Çeşiti	Atık Kabuk Yüzdesi	Üretim Miktarı (x10 ³ ton) / Atık Kabuk Miktarı (x10 ³ ton)				
		2015	2016	2017	2018	2019
Antep fıstığı	%30,00	144/43,2	170/51	78/23,4	240/72	85/25,5
Badem	%58,68	80,0/46,9	85/49,9	90/52,8	100/58,7	150/88,0
Ceviz	%48,42	190/92,0	195/94,4	210/101,7	215/104,1	225/108,9
Fındık	%48,23	646/311,5	420/202,6	675/325,6	515/24,8	776/374,3
Kestane	%20,00	63,8/12,8	64,8/12,9	62,9/12,6	63,6/12,7	72,7/14,5

Çalışmada seçilen bir diğer atık ürünler de mineral yünlerdir. Yalıtım ürünlerinin aynı zamanda yangına karşı dayanıklı olması beklenir. Tablo 3’teki malzemeler incelendiğinde, cam yünü ve taş yünü yangın dayanımı açısından en iyi malzemeler olarak öne çıkmaktadır. Mineral yünler (MY), yüksek su emilimi açısından dezavantajlı olsa da su ile temasını azaltacak uygulamalar sayesinde, yüksek oranda tercih edilmektedir. Çalışmada bu malzemelerin düşük ısı iletkenliğinden dolayı üretilen yeni kompozitlerde de kullanılması araştırılmak istenmiştir.

Tablo 3. Isı yalıtım malzemelerinin karşılaştırılması (Özer & Acun Özgünler, 2019)

Malzeme	Özellik										
	Isıl İletkenlik (w/m.k)	Yangın Dayanım Sınıfı	Birim Hacim Kütle (kg/m ³)	Ort. Su Emilimi	Buhar Difüzyon Direnci	Basınç Dayanımı (kpa)	Kimyasallara Dayanıklılık	Parazitlere Dayanıklılık	Çürümezlik	İşlenebilirlik	Maliyet
Cam yünü	0,035 0,050	A1-A2	15 150	Yüksek	1	15 80	+++	+++	°	+++	Orta
Taş yünü	0,035 0,050	A1	20 200	Yüksek	1	15 80	++	+++	°	+++	Orta
Ahşap yünü levha (WF)	0,065 0,090	B	360 460	Yüksek	2 5	40 200	++	++	•	+++	Orta
Ahşap lifli levha (WW)	0,035 0,070	B	110 450	Yüksek	5	150 200	++	+++	•	++	Orta

(+++): iyi, (++): orta, (+): kötü, (°): Çürümez, (•):Çürüyebilir

Bunların yanı sıra yalıtım ürünü olarak kullanılan cam yünü, taş yünü, ve mobilyacılıkta kullanılan MDF atıklarının tekrar kullanılması önemlidir. Yapılarda kullanım ömrünü tamamlamış atık yalıtım malzemelerinin bertarafı çevre kirliliğine neden olmaktadır. Türkiye’de ısı, ses ve yangın yalıtım malzemesi yıllık üretimi 2014 yılı için 456285 ton iken, 2018 yılı itibarıyla 715242 tona ulaşmıştır (İMSAD, 2019).

Binalarda kullanım ömrünü tamamlamış atık mineral yünlerde çevre kirliliğine neden olmaktadır. Çalışma kapsamında atık ürünlerin öğütülerek kullanılabilirliğinin belirlenmesi ile çevre kirliliğine neden olan malzemelerin ekonomiye kazandırılması hedeflenmiştir. Ayrıca MDF tozu ve ceviz kabuğunun, sanayisi gelişmemiş küçük şehirlerde geri dönüşümde kullanımının sağlanması amaçlanmıştır. Öğütülmüş taş yünü, cam yünü ve ceviz kabuğu ürünlerinden elde edilen yalıtım malzemeleri ile ilgili literatürde herhangi bir çalışmanın olmaması, çalışmanın özgün niteliğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, polyester reçine içerisine MDF tozu, öğütülmüş taş yünü, cam yünü ve ceviz kabuğundan oluşan atık ürünlerin her biri ayrı ayrı olarak %10 oranında polimer matrisi ile ikame edilerek 5 farklı kompozit üretilmiştir. Üretilen kompozit numunelerin yalıtım malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla, ısı iletkenliği, birim hacim ağırlığı ve ultrases geçiş hızı değerleri incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Malzeme Seçimi

Çalışmada kullanılan taş yünü ve cam yünü, Bingöl Üniversitesi Eğitim yapısı imalatında kullanılan malzemelerden artan ve kullanılmayacak durumda olan atıl halleri öğütülerek kullanılmıştır. Ceviz kabuğu, Bingöl yöresinde yetişen ceviz kabukları öğütülerek kullanılmıştır. MDF tozu ise Bingöl Organize Sanayi Bölgesinde faaliyet yürüten Kardelen Mobilya firmasının atık depolama alanından temin edilmiştir. Öğütülmüş malzemeler Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Kullanılan öğütülmüş malzemeler ceviz kabuğu (a), cam yünü (b), taş yünü (c), MDF tozu (d)

Matris ve faz malzemeden oluşan polimer bazlı kompozit için kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri Tablo 4’te belirtilmiştir.

Tablo 4. Kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri

Polimer Kompozit Bileşenleri		Kullanılan Ürün	Yoğunluk (gr/cm ³)
Matris	Reçine	Doymamış polyester	1,353
	Sertleştirici	Methyl ethyl ketone peroxide (Mekp)	1,17
	Hızlandırıcı	Kobalt	0,92
Takviye malzeme	Taş yünü	Öğütülmüş taş yünü	1,960
	Cam yünü	Öğütülmüş cam yünü	1,756
	Ceviz kabuğu	Öğütülmüş ceviz kabuğu	1,259
	MDF tozu	Planya atığı (MDF tozu)	0,749

Çalışma kapsamında kullanılan TP100 döküm tipi polyester reçinenin özellikleri Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Polyester reçine özellikleri (Turkuaz Polyester, 2020)

Test	Değer
Renk	Renksiz
Özgül ağırlık	1,17
Vizkozite	350-500 cps
Parlama noktası	23-60 °C

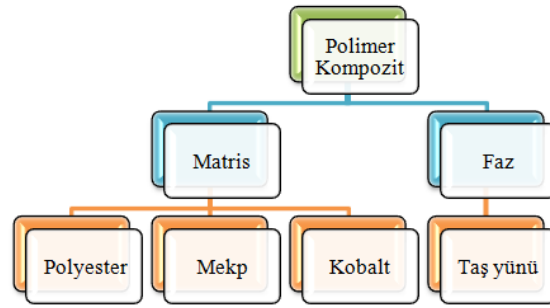
2.2. Polimer Kompozitlerin Üretilmesi

Literatürden hareketle tüm malzemeler (MDF tozu, öğütülmüş cam yünü, taş yünü ve ceviz kabuğu) için polyester ile ikame oranı %10 olarak seçilmiş (Özel vd., 2015; Aygün, 2020) ve 5 farklı kompozit üretilmiştir.



Şekil 2. Polimer Matris Bileşenleri

Çalışma kapsamında kullanılacak polimer kompozit üretiminde polyester reçine, bağlayıcı matris olarak kullanılmıştır. Ayrıca MDF tozu, öğütülmüş taş yünü, cam yünü ve ceviz kabuğu panel üretiminde faz malzemeler olarak kullanılmıştır.



Şekil 3. Polimer Kompozit Bileşenleri

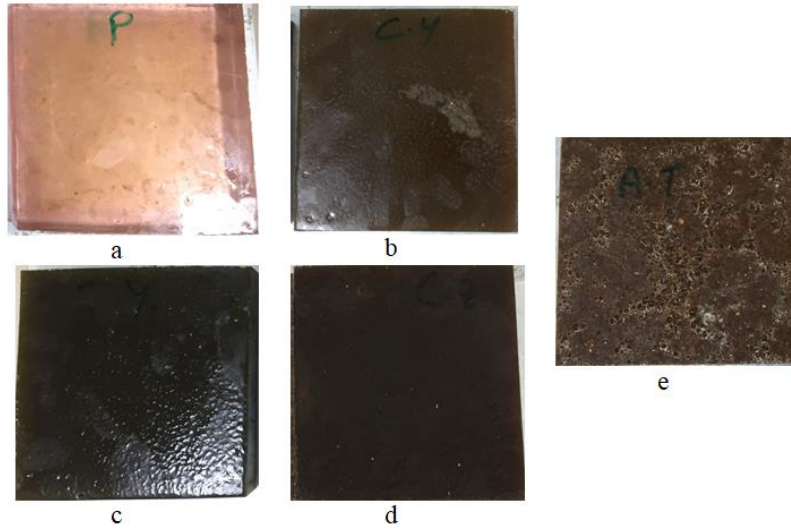
Polimer matris oluşturulurken sertleştirici olarak Mekp (metil, etil, keton ve peroksit) ve hızlandırıcı olarak organik peroksit (Kobalt) kullanılmıştır (Özel vd., 2015). Ayrıca üretilen numunelerin kalıptan kolay bir şekilde çıkarılması için kalıp ayırıcı vaks kullanılmıştır (Polat & Oltulu, 2018). Matris malzemeye faz malzemeleri de katılarak polyester matrisli polimer numuneler üretilmiştir (Şekil 3).

Matris malzeme üretilirken polyester malzemenin ağırlıkça %1'i oranında Mekp ve %0,2 oranında kobalt eklenmiştir. Takviye malzeme kullanım oranları Tablo 6'da belirtilmiştir. Numuneler 150x150x30 mm³ ebatlarında üretilmiş ve oda sıcaklığında 28 gün kür işlemine tabi tutulduktan sonra deneylere başlanmıştır.

Tablo 6. Kompozit levhaların karışım oranları

Kod	Matris Malzeme	Kullanım Oranı (Ağırlıkça %)	Takviye Malzeme	Kullanım Oranı (Ağırlıkça %)
P1		100	-	0
T1		90	Taş yünü	10
C1	Polyester + Mekp + kobalt	90	Cam yünü	10
CZ1		90	Ceviz kabuğu	10
M1		90	MDF tozu	10

Polimer kompozit üretiminde, polimer matris (polyester reçine, mekp ve kobalt) 300 saniye mikserde karıştırılmıştır (Polat vd., 2020). Daha sonra takviye malzeme polimer matrise eklenip 300 sn daha karıştırılarak ahşap (parlak yüzeyli MDF) kalıplara yerleştirilmiştir.



Şekil 4. Üretilen polimer bazlı kompozit levhalar, polimer (a), cam yünü (b), taş yünü (c), ceviz (d) ve MDF (e)

Birim hacim ağırlık (BHA) deneyi

Üretilen kompozitlerin yoğunluklarının belirlenmesi için (TS EN 1015-10, 2001)'e göre birim hacim ağırlık deneyi yapılmıştır.

Isıl iletkenlik katsayısının belirlenmesi

Polimer kompozit numunelerinin ısı iletkenlik ölçümleri, ASTM C 1113-90, sıcak tel yöntemine göre yapılmıştır (ASTM C1113/C1113M-09, 2013). Ölçümlerde Şekil 5'te gösterilen KEM QTM 500 marka cihaz kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin ısı iletkenlik katsayıları Tablo 7'de verilmiştir.



Şekil 5. Isı İletkenlik Katsayısı Ölçme Cihazı (KEM QTM 500)

Tablo 7. Kullanılan malzemelerin ısı iletkenlik katsayıları (Özer & Acun Özgünler, 2019)

Sıra No	Kullanılan Malzeme	Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)
1	Taş yünü	0,035-0,050
2	Cam yünü	0,035-0,050
3	Planya talaşı	0,070

Ultras ses geçiş hızının belirlenmesi

Bu yöntemde incelenmek istenen numunede alıcı ile verici arasında ultrasonik ses dalgalarının geçiş süresi ölçülür. Ölçüm işlemi, ultras ses cihazı ile ölçülen ses üstü dalganın gönderildiği yüzeyden alındığı numune yüzeyine kadar geçen zaman (mikrosaniye) ölçülür. Gerekli hesaplamalar yapıldıktan sonra ses üstü dalga hızı (m/s) elde edilir (Erdoğan, 2013). Kurama ve Eren Gültekin, (2014) yaptıkları çalışmada Ultrasonik dalga hızlarının ölçülmesiyle seramiklerin fiziksel özelliklerinin tahmin edilebileceğini ifade etmişlerdir. Polyester ve cam elyaf katkılı kompozitte elyaf miktarının artmasına bağlı olarak ultras ses geçiş hızı artmaktadır (Wróbel

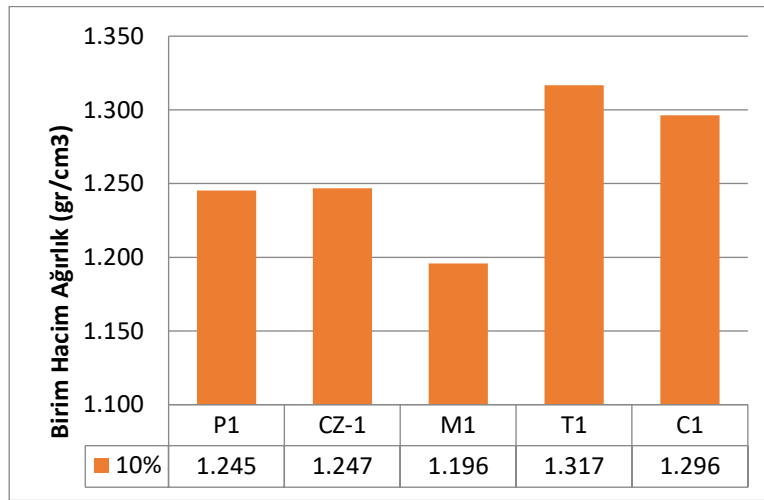
& Pawlak, 2007). Ayrıca yapılan başka bir çalışmada camı faz miktarının artmasıyla birlikte ultrasonik dalga hızlarının da arttığı ifade edilmiştir (Gultekin vd., 2015).

3. Bulgular ve Tartışma

Hazırlanan numuneler birim hacim ağırlığı, ultrases geçiş hızı ve ısı iletkenlik katsayısı ölçüm işlemlerine tabi tutulmuştur.

3.1. Birim Hacim Ağırlık Deney Sonuçları

Yapılan ölçümler neticesinde numunelerin BHA değerleri Tablo 8 ve Şekil 6'da verilmiştir. Kontrol numunesi olarak kullanılan polimer numunesinin BHA değeri 1,245 gr/cm³ olarak belirlenmiştir. M1 numunesinin BHA değerinde (1,196 g/cm³) düşüş meydana gelmiştir. Bunun nedeni olarak MDF tozunun yoğunluğunun daha düşük olması düşünülmektedir. Ancak mineral yünlerin ilave edilmesiyle birlikte elde edilen numunelerin BHA değerlerinde artışlar meydana gelmiştir (T1=1,317 g/cm³, C1=1,296 g/cm³). Ceviz kabuğu ilave edilerek elde edilen numunede ise kontrol numunesine daha yakın BHA değeri elde edilmiştir (1,247 g/cm³). Ceviz kabuğu yoğunluğunun kontrol numunesi olan polimerin yoğunluğuna yakın olmasından kaynaklı olarak BHA değerleri birbirine yakın çıkmıştır.



Şekil 6. Kompozit numunelerin birim hacim ağırlık (BHA) değerleri

3.2. Isıl İletkenlik Deney Sonuçları

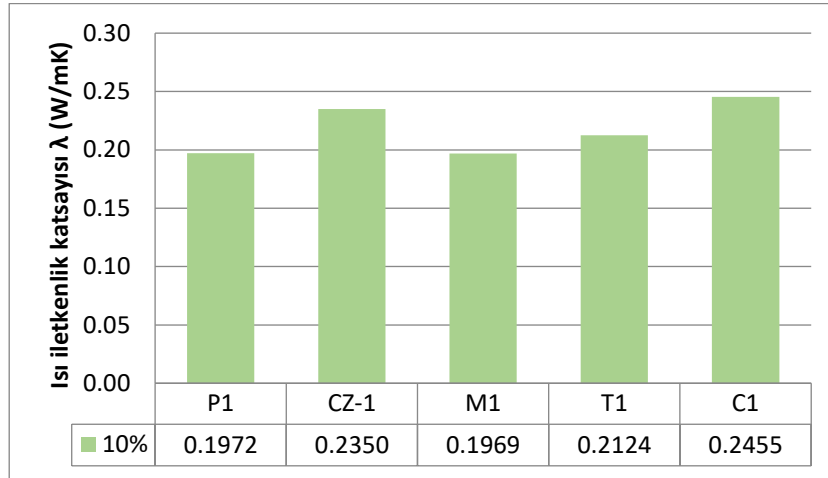
Numunelerin ön yüzünden 3, arka yüzünden 3'er adet olmak üzere toplamda 6 ölçüm yapılmıştır. Bu ölçüm değerlerinin ortalaması alınarak ısı iletkenlik katsayıları belirlenmiştir. MDF tozu eklenerek elde edilen M1 numunesinin gözlemsel muayene neticesinde homojen bir dağılım gösterdiği ve istenen boşluklu yapıyı meydana getirdiği belirlenmiştir. Buna bağlı olarak ısı iletkenlik değeri kontrol numunesi P1'den kısmen daha düşük çıkmıştır. Mineral yün eklenmesiyle elde edilen kompozit numunelerin ısı iletkenlik değerlerinde artışlar meydana gelmiştir (Tablo 8, Şekil 7). Mineral yünlerin öğütülmüş olması nedeniyle beklenen boşluklu yapının oluşturulamaması bu etkiyi meydana getirdiği düşünülmektedir.

Tablo 8. Kompozit levhaların BHA, Isıl iletkenlik katsayısı ve ultrases geçiş hızı değerleri

Numune Türü	Kod	BHA gr/cm ³	Isıl İletkenlik	Ultrases Geçiş
			Katsayısı λ (W/mK)	Hızı m/sn
Taş yünü	T1	1,317	0,2124	2468,067
Cam yünü	C1	1,296	0,2455	2545,690
MDF tozu	M1	1,196	0,1969	2357,724
Ceviz	CZ-1	1,247	0,2350	2516,071
Kontrol	P1	1,245	0,1972	2500,862

Ceviz kabuğu eklenmiş CZ-1 nolu numunede ısı iletkenlik değeri kontrol numunesi P1'e göre daha yüksek çıkmıştır. Ceviz kabuğu yoğunluğunun polimerin yoğunluğundan kısmen daha fazla olması nedeniyle taneli yapıdaki ceviz kabukları dibe çökmüştür. Beklenen homojen boşluklu yapının oluşmamasından kaynaklı olarak CZ-1 numunesinin ısı iletkenlik değeri kontrol numunesi P1'den daha yüksek çıkmıştır (Tablo 8). Homojen dağılımın sağlanması neticesinde daha düşük değerlerin elde edileceği beklenmektedir.

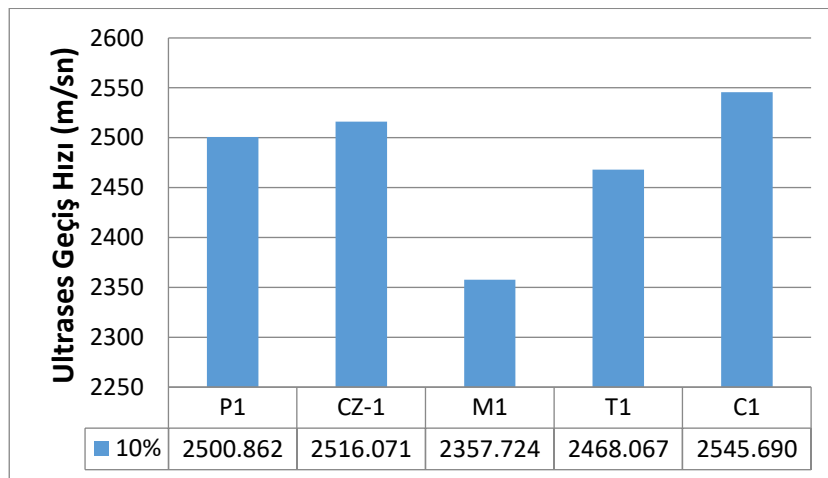
ISO ve CEN standartlarına göre ısı yalıtım malzemelerinin ısıl iletkenlik değerinin $\lambda=0,065$ W/mK olması gerekmektedir. Bu değerden yüksek ısıl iletkenlik değerine sahip malzemeler ise yapı malzemeleri olarak tanımlanmaktadır (Özgür vd., 2015; Uluer vd., 2018). Subba Raju ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada polyester-kenevir, jüt ve cam elyaf liflerinin kompozit ürünlerdeki etkisini incelemişlerdir. Presleme yöntemi ile homojen numuneler üretmişlerdir. Yaptıkları çalışma neticesinde lif miktarının artmasına bağlı olarak ısı iletkenlik değerlerinde düşüş olduğunu, sıcaklık etkisiyle de artış olduğunu belirtmişlerdir. Hacimce % 18 lif kullanarak 30° C’de $\lambda=0,21$ W/mK ısıl iletkenlik değeri elde etmişlerdir. Pradhan vd., (2020) yaptıkları çalışmada ceviz kabuğu tozu takviyeli polimer kompozitin ısıl iletkenlik değerini 0,265 W/mK olarak elde etmiştir. Yaptığımız çalışmada, M1 numunesinde en düşük ısıl iletkenlik değeri ($\lambda=0,1969$ W/mK) elde edilmiştir.



Şekil 7. Kompozit levhaların ısıl iletkenlik katsayısı değerleri

3.3. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları

Kontrol numunesi P1’in ultrases geçiş hızı değeri 2500,862 m/sn olarak tespit edilmiştir. MDF tozu eklenen kompozit levhada 2357,724 m/sn ile en düşük değer olarak elde edilmiştir. MDF tozu ve taş yünü katkılı polimer kompozit değerleri ise kontrol numunesinin ölçüm değerinden düşük çıkmıştır. Ancak Cam yünü ve ceviz kabuğunun ultrases değerlerinin kontrol numunesi ölçüm değeri olan 2500,862 m/sn’den yüksek çıktığı belirlenmiştir (Tablo 8, Şekil 8). Wróbel ve Pawlak 2007 yılında yaptıkları çalışmada Polyester ve cam elyaf katkılı kompozitte elyaf miktarının artmasına bağlı olarak ultrases geçiş hızının arttığını belirtmişlerdir. Yaptığımız çalışmada, ceviz ve cam yünü takviyeli kompozitlerin ultrases geçiş hızı değerleri kontrol numunesine göre artmıştır. Ancak MDF tozu ve taş yünü takviyeli kompozitlerin ultrases geçiş hızı değerleri ise kontrol numunesinden daha düşük çıkmıştır.



Şekil 8. Kompozit numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri

4. Sonuçlar

Üretilen kompozitlerin gözle yapılan incelemesinde, MDF tozunun polimer matris içerisinde homojen dağılım gösterdiği, ancak taş yünü, cam yünü ve ceviz kabuğunun kısmen dibe çöktüğü görülmüştür. Atık malzemeler kullanılarak üretilen polimer kompozit numuneler birim hacim ağırlığı, ultrases geçiş hızı ve ısıl iletkenlik katsayısı ölçüm işlemlerine tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Çalışmada kullanılan öğütülmüş malzemelerin içerisinde lif bulunmamaktadır. Buna karşın M1 numunesinde kullanılan testere atığı MDF tozu ise lifli bir yapıya sahiptir. Bu lifli yapı nedeniyle Ultrases geçiş hızı, BHA ve ısı iletkenlik bakımından en düşük değerlere M1 numunesinde ulaşılmıştır. M1 numunesinde kullanılan MDF tozu kompozit içerisinde homojen dağılmıştır. Buna bağlı olarak kompozitlerde boşluklu yapı oluşturması neticesinde yapılan Ultrases geçiş hızı, BHA ve ısı iletkenlik deneylerinde en iyi sonuçları verdiği görülmüştür.

- Planya atığı MDF tozunun kullanıldığı M1 kompoziti düşük BHA ile öne çıkmaktadır.
- En düşük ısı iletkenlik değerine MDF tozu takviyeli kompozit ile ulaşılmıştır.
- Ultrases geçiş hızı açısından en düşük değere, MDF tozu takviyeli kompozit ile ulaşılmıştır.

Konuyla ilgili yapılacak diğer çalışmalar için farklı reçineler ile değişen takviye malzeme (özellikle atık malzeme) oranlarında üretimler yapılması, kompozitlerin dayanım-durabilite özelliklerinin incelenmesi, XRD, FTIR ve SEM gibi diğer analizlerle içyapı özelliklerinin de incelenmesi konuları tavsiye edilmektedir.

Referanslar

- Abu-Jdayil, B., Hittini, W., & Mourad, A. H. (2019). Development of date pit-polystyrene thermoplastic heat insulator material: Physical and thermal properties. *International Journal of Polymer Science*. <https://doi.org/10.1155/2019/1697627>
- Abu-Jdayil, B., Mourad, A.-H., Hittini, W., Hassan, M., & Hameedi, S. (2019). Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview. *Construction and Building Materials*, 214, 709–735. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.102>
- Ahmad, H., Islam, M., & Uddin, M. (2014). Thermal and Mechanical properties of epoxy-jute fiber composite. *Journal of Chemical Engineering*, 27(2), 77–82. <https://doi.org/10.3329/jce.v27i2.17807>
- Akçay, M. E., & Tosun, İ. (2005). Bazı geç çiçek açan yabancı badem çeşitlerinin yalova ekolojik koşullarındaki gelişme ve verim davranışları. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 36(1), 1–5. <https://doi.org/10.17097/zfd.22457>
- Alsewailem, F. D., & Binkhder, Y. A. (2010). Preparation and characterization of polymer/date pits composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(11), 1743–1749. <https://doi.org/10.1177/0731684409337339>
- ASTM C1113/C1113M-09. (2013). *Standard Test Method for Thermal Conductivity of Refractories by Hot Wire (Platinum Resistance Thermometer Technique)*. ASTM International West Conshohocken, PA.
- Aygün, H. H. (2020). Lif Açma İşleminin Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozitlerin Mekanik ve Yalıtım Özellikleri Üzerindeki Etkisi. *Tekstil ve Mühendis*, 27(18), 75–83. <https://doi.org/10.7216/1300759920202711803>
- Balık, H. İ., Kayalak Balık, S., & Okay, A. N. (2015). Yeni Fındık Çeşitleri (Okay 28 ve Giresun Melezi). *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 19(2), 104–109.
- Binici, H., Sevinç, A. H., Eken, M., & Demirhan, C. (2014). Mısır Koçanı Katkılı Isı Yalıtım Malzemesi Üretimi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(2), 13–26. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.242831>
- Çetinkaya, A. (2016). *Sert Kabuklu Meyve Türlerinin Muhafazası*. Tarım Kütüphanesi. Erişim Tarihi: 16.10.2020. http://www.tarimkutuphanesi.com/sert_kabuklu_meyve_turlerinin_muhafazasi_aynur_cetinkaya_ev_ekonomisi_teknisyeni_01593.html
- De Albuquerque, A. C., Joseph, K., de Carvalho, L. H., & D’Almeida, J. R. M. (2000). Effect of wettability and ageing conditions on the physical and mechanical properties of uniaxially oriented jute-roving-reinforced polyester composites. *Composites Science and Technology*, 60(6), 833–844. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(99\)00188-8](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(99)00188-8)
- De Farias, M. A., Farina, M. Z., Pezzin, A. P. T., & Silva, D. A. K. (2009). Unsaturated polyester composites reinforced with fiber and powder of peach palm: Mechanical characterization and water absorption profile. *Materials Science and Engineering: C*, 29(2), 510–513.
- Devireddy, S. B. R., & Biswas, S. (2016). Physical and thermal properties of unidirectional banana-jute hybrid fiber-reinforced epoxy composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35(15), 1157–1172. <https://doi.org/10.1177/0731684416642877>

- Dhakal, H. N., Zhang, Z. Y., & Richardson, M. O. W. (2007). Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. *Composites Science and Technology*, 67(7–8), 1674–1683. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.06.019>
- Erdoğan, T. Y. (2013). *Beton* (4. Baskı). ODTÜ Yayıncılık, Ankara.
- Gultekin, E. E., Ozturk, Z. B., & Kurama, S. (2015). The effect of porosity and glassy phase amount of porcelain tiles on ultrasonic velocity. *Journal of the Australian Ceramic Society*.
- İMSAD. (2019). *Türkiye İnşaat Malzemesi Sanayicileri Derneği (İMSAD) yapı sektörü raporu*. Erişim Tarihi: 02.11.2020. https://www.imsad.org/Uploads/Files/Turkiye_IMSAD_Yapi_Sektoru_Raporu_2019.pdf
- Kalkancı, N. (2013). Tarımsal Atıkların (Antepfıstığı, Zeytin, Bağ) Kompost Olarak Değerlendirilmesi. *Antepfıstığı Araştırma Dergisi*, 2. https://arastirma.tarimorman.gov.tr/afistik/Belgeler/DERGILER/ANTEPFISTIĞI_DERGİSİ_SAYI-2.pdf
- Kurama, S., & Eren Gültekin, E. (2014). Characterization of Silicate Ceramics Using Ultrasonics Test Method. *Advances in Science and Technology*, 92, 194–202. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ast.92.194>
- Muthukumar, K., Sabariraj, R., Kumar, S. D., & Sathish, T. (2020). Investigation of thermal conductivity and thermal resistance analysis on different combination of natural fiber composites of Banana, Pineapple and Jute. *Materials Today: Proceedings*, 21, 976–980. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2214785319333838?token=01706A69B460584A18E56224F76EEB8BA24B510DF928334F5BC0A19356B1AD9C2C1B3681540FF86FF3806EA7E3D1B620>
- Mwaikambo, L. Y., & Bisanda, E. T. N. (1999). Performance of cotton-kapok fabric-polyester composites. *Polymer Testing*, 18(3), 181–198. [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(98\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(98)00017-8)
- Özel, C., Koru, M., & Bayram, Y. (2015). Mineral ve Fiber İçeren Polimer Betonların Plaka Sıcaklıklarına Bağlı Isı İletkenlik Katsayılarının İncelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*.
- Özer, N., & Acun Özgünler, S. (2019). Yapılarda Yaygın Kullanılan Isı Yalıtım Malzemelerinin Performans Özelliklerinin Duvar Kesitleri Üzerinde Değerlendirilmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt, 24*. <https://doi.org/10.17482/uumfd.438738>
- Özgür, Y., Özkan, Ş., Haluk, S., Osman, Ç., İlkay, K., Şükrü, E., & Demet, Ö. (2015). Binalarda Isı Yalıtımı ve Isı Yalıtım Malzemeleri. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 487, 62–75.
- Patnaik, T. K., & Nayak, S. S. (2018). Development of Silicon Carbide Reinforced Jute Epoxy Composites: Physical, Mechanical and Thermo-mechanical Characterizations. *Silicon*, 10(1), 137–145. <https://doi.org/10.1007/s12633-015-9393-5>
- Polat, H., Demirel, B., Kolak, M. N., & Oltulu, M. (2020). Polimer Betonlarda Barit Minerali Kullanımının Araştırılması. *Bingöl Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi*, 1(1), 25–32.
- Polat, H., & Oltulu, M. (2018). Andezit Atıklı Polimer Kompozitlerin Mekanik Özellikleri. *1. Uluslararası Battalgazi Multi Disipliner Çalışmalar Kongresi*, 1, 213–222.
- Pradhan, P., Nanda, B. P., & Satapathy, A. (2020). Polyester composites filled with walnut shell powder: Preparation and thermal characterization. *Polymer Composites*. <https://doi.org/10.1002/pc.25620>
- Reddy, M. I., Kumar, M. A., Reddy, S. A., & Raju, P. V. K. (2018). Thermo physical properties of Jute, Pineapple leaf and Glass fiber reinforced polyester hybrid composites. *Materials Today-Proceedings*, 5(10, 1), 21055–21060.
- Satyanarayana, K. G., Sukumaran, K., Kulkarni, A. G., Pillai, S. G. K., & Rohatgi, P. K. (1983). Performance of Banana Fabric-Polyester Resin Composites. *Composite Structures 2* (ss. 535–548). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-6640-6_38
- Subba Raju, N. V., Indra Reddy, M., Anil Kumar, M., & Ramji, K. (2018). Study on thermo physical properties of hemp, jute and glass fiber reinforced polyester composites. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 5918–5924. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.191>

TS EN 1015-10. (2001). *Kâgir Harcı-Deney Metotları- Bölüm 10: Sertleşmiş Harcın Boşluklu Kuru Birim Hacim Kütlesinin Tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TUİK. (2020). *Türkiye'deki sert kabuklu meyve üretim miktarları*. Erişim Tarihi: 03.10.2020. <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?locale=tr>

Turkuaz Polyester. (2020). *TP100 Döküm Tipi Polyester Reçine*. Erişim Tarihi: 11.02.2020. <https://www.turkuazpolyester.com.tr/UPLOAD/URUN/FILES/TP100DôKoMTôPôPOLYESTERREÄðNEGBF-121134515.pdf>

Uluer, O., Karaagac, I., Aktas, M., Durmus, G., Agbulut, U., Khanlari, A., & Celik, D. N. (2018). An investigation of usability of expanded perlite in heat insulation technologies. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences-Pamukkale Universitesi Muhendislik Bilimleri Dergisi*, 24(1), 36–42. <https://doi.org/10.5505/pajes.2017.61687>




Wróbel, G., & Pawlak, S. (2007). The effect of fiber content on the ultrasonic wave velocity in glass/polyester composites. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 20(1–2), 295–298.

Yaman, K. (2012). Bitkisel Atıkların Değerlendirilmesi ve Ekonomik Önemi. *Journal of Forestry Faculty of Kastamonu University*, 12(2), 339–348.



Panel Güneş Kolektörlerinde Farklı Emici Yüzey Geometrilerinin Kullanımının Isıl Karakteristiklere olan Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi

Numerical Analysis Of The Effect Of The Use Of Different Absorbent Surface Geometries On Thermal Characteristics in Panel Solar Collectors

Raşit Çelik , Ömer Resuloğulları , Ali Erişen 

¹Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 22/12/2020

Kabul / Accepted: 21/01/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 29/01/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Özet

Günümüzde enerjiye olan ihtiyaç sürekli olarak artmaktadır. Enerjinin sürekliliği büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi her geçen gün artmaktadır. Özellikle güneş enerjisinin önemi son dönemde ciddi bir artış göstermektedir. Bu çalışmada güneş enerjisinden maksimum seviyede faydalanmak için kolektör verimini arttıracak emici yüzey geometrileri tasarlanmıştır. Belirlenen geometrilerin yüzey alanına düşen güneş enerjisi miktarları tespit edilerek HAD (ANSYS) programında analizi yapılmıştır. 1kg/s, 0,1 kg/s, 0,01 kg/s giriş debileri için; her bir debide 290 K, 300 K, 310 K, 320 K giriş sıcaklığı kullanılarak analizler tamamlanmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde; akışkanın giriş sıcaklığı değiştirildiğinde çıkış sıcaklığının lineer olarak artış gösterdiği görülmüştür. Ayrıca geometrilere baktığımızda açılı yüzeydeki akışkan çıkış sıcaklığının, dik yüzeyli geometriye göre daha fazla olduğu görülmüştür. Kolektör geometrilerinde açılı yüzey kullanımının güneş enerjisi absorbe miktarını arttıracığı sonucu çıkarılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Kolektörler, Optik Analiz, HAD Analizi, Çıkış Sıcaklığı”

Abstract

Today, the need for energy is constantly increasing. The continuity of energy is of great importance. Therefore, the importance of renewable energy sources is increasing day by day. Especially the importance of solar energy has increased significantly recently. In this study, absorbent surface geometries are designed to increase collector efficiency in order to benefit from solar energy at maximum level. The amount of solar energy falling on the surface area of the determined geometries was determined and analyzed in the HAD (ANSYS) program. For 1kg / s, 0.1 kg / s, 0.01 kg / s inlet flow rates; Analyzes have been completed using 290 K, 300 K, 310 K, 320 K inlet temperature at each flow rate. When the results obtained are examined; It has been observed that when the inlet temperature of the fluid is changed, the outlet temperature increases linearly. In addition, when we look at the geometries, it is seen that the fluid outlet temperature on the angled surface is higher than the geometry with a vertical surface. It was concluded that the use of angled surfaces in collector geometries will increase the amount of solar energy absorption.

Key Words

“Collectors, Optical Analysis, CFD Analysis, Outlet Temperature ”

1.Giriş

Gelişmekte olan ülkelere baktığımızda en önemli ihtiyacın enerji kaynağı olduğu görülmektedir. Bu nedenle alternatif enerji kaynaklı sistemlere ihtiyaç duyulmakla birlikte, bu sistemlerin daha verimli hale getirilebilmesi için de ciddi çalışmalar yapılması gerekmektedir. Bu bağlamda yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde güneş enerjisi sistemleri oldukça büyük bir paya sahiptir. Güneş enerjisi, ısıtma ve elektrik eldesi için kullanılmakta ve bugünkü çalışmalar bu iki temel konu üstüne yoğunlaşmıştır. Bu çalışmanın konusu, güneş enerjisinden ısıtma amaçlı olarak yararlanılan, düz güneş kolektörlerin, yüzey geometrisinin değişik tasarımlarıyla, verimlerinin incelenmesidir. Bu kısımda, yapılan çalışmalar ile ilgili bazı araştırmalara aşağıda yer verilmiştir.

Atıcı M., (2006), yaptığı tez çalışmasında, Havalı kolektörler için yaptığı çalışmada değişik yüzey profilleri kullanarak ısı verimi arttırmayı planlamıştır. Belirlemiş olduğu düz, oluklu, trapez emici yüzey tasarlanarak yüzey alanı artırılması, akışkanın akış yolunu uzatması ile akışkanın taşınım katsayısı artırılarak, kolektörün ısı performansını artırılmıştır. 2006 yılı Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında Elazığ da yaptığı deneylerde düz bir kolektöre göre %30-%40 arasında artış olduğunu tespit etmiştir.

M. Galip ÖZKAYA, H. İbrahim VARİYENLİ, M. KORKMAZ, (2007), bu çalışmada, düzlemsel güneş kolektörlerinde farklı geometride emici yüzeyler kullanılarak deneysel çalışma yaparak, çıkan sonuçların karşılaştırması yapılmıştır. Düz yüzeyli kolektör verimi %32,9, zikzak kanallı kolektörlerden, boru birleşimi üstteki emici yüzeyin verimi %32,1, boru birleşimi ortadaki emici yüzeyin verimi %36,3, parabolik kanallı kolektörün verimi %26,7, olarak bulunmuştur. Sonuç olarak boru birleşimi ortada olan sistemin verimi diğerlerinden yüksek bulunmuştur.

Şahin T., (2010) bu tez çalışmasında, güneşin gün boyunca değişik açılarla gelen ışınımından faydalanılarak düz ve bükülmüş güneş kolektörlü sistemler hazırlanarak sıcaklık değişimi olup olmayacağı incelenmiştir. Isparta ilinde temmuz ayının 9, 11, 12, 13, 15, 17, 18, 20, 21, 23'üncü günlerinde sistemler üzerinden veriler alınmış ve karşılaştırma yapılmıştır. Alınan sonuçlara göre düzlemsel güneş kolektörüne verilen eğim sonucunda sıcaklık artışı olmadığı görülmüştür.

M. ABUŞKA ve M. Bahattin AKGÜL, (2014), yaptıkları çalışmada, yutucu geometrisi trapez tip olan güneş kolektörlerinin selektif solar boyalı ve siyah boyalı olan yüzeylerinin ısı verimini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerde dış hava sıcaklığı, ışınım, yutucu yüzey üzerinde iki noktadan yapılan sıcaklık ölçümü ve akışkan çıkış sıcaklığı ölçülerek ısı verim hesaplaması yapılmış, selektif solar boyalı kolektörün, siyah boyalı kolektöre oranla ısı veriminin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

M. ABUŞKA, M. Bahattin, V. ALTINTAŞ, (2015), yaptıkları çalışmada, ısı veriminin artırılması amacıyla emici yüzey üzerine konik engeller yerleştirilerek deneysel olarak incelemesini yapmışlardır. Deneyler de havanın kolektöre giriş ve çıkış sıcaklığı, havanın çıkış hızı, radyasyon miktarı, emici yüzey sıcaklığı, kasa sıcaklığı, saydam örtü sıcaklığı ölçülerek hesaplamalar yapılarak ısı verim belirlenmiştir. Konik yüzey geometrilili kolektör verimi %62, düz yüzeyli kolektör verimi %30 olarak tespit edilmiştir.

D.M. Medina Carril, J.G. Carrillo, R.D. Maldonado, ve F. Avilés, (2016), yaptıkları çalışmada, farklı emici yüzeye sahip güneş kolektörlerindeki termal davranışı sonlu elemanlar yöntemiyle belirlemişlerdir. Kullanılan yüzey geometrileri dikdörtgen ve kavisli geometrilerdir. Yapılan analiz sonucu kavisli geometrinin dikdörtgen geometriye oranla %25 daha fazla verime sahip olduğu görülmüştür.

H. Kavooosi Balotaki, M.H. Saidi, (2017), yaptıkları çalışmada, dikdörtgen kanatlı çift amaçlı kolektör tasarımı yaparak aynı anda iki farklı sıvıya ısı transferi yapmayı hedeflemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda akışkanların çıkış sıcaklıkları artmış, çift amaçlı kolektörde dikdörtgen hava kanallarında oluklu, düz, V tipi kanallara oranla %11' lik verim artışı tespit edilmiştir.

M. B. ÖZDEMİR, M. M. YATARKALKMAZ, G. DAĞLI, (2017), yaptıkları çalışmada, bakır ve alüminyum emici yüzeye sahip diğer özellikleri benzer olan düz plaka kolektörlerin TS EN 12975-2 standardında güneş takip sistemi olan deney düzeneğinde test edilmiş, 40°C'ye kadar alüminyum emici yüzeyli kolektörün daha verimli olduğu, 40°C' den yüksek sıcaklıklarda ise bakır emici yüzeyli kolektörün daha verimli olduğunu tespit etmişlerdir. Bununla birlikte ekserji verimlerini de hesaplayarak karşılaştırmışlardır.

Muhammed Amine Amraoui, Khaled Aliane (2018) yaptıkları çalışmada, zaman ve maliyeti azaltan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği kullanılarak içerisinde bölmeler oluşturulan düz güneş kolektörün sıvı akışı ve ısı transferinin analizini yapmışlardır. . Kolektörün hava girişini içeren 3 boyutlu modeli ANSYS Workbench ile modellenmiş ve grid ANSYS ICEM' de oluşturmuşlardır. Sonuçları ANSYS FLUENT ve ANSYS CFX kullanılarak elde etmişlerdir. Yapılan bu çalışma ile güneş kolektöründen çıkan akışkanın deneysel çıkış sıcaklığı ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile belirlenen çıkış sıcaklığı arasında ciddi bir benzerlik olduğunu belirlemişlerdir.

Kumar ve ark. (2017) bu çalışmada, Had analizi yardımıyla oluklu tip emici plakaya sahip havalı güneş kolektörünün türbülans modellerine göre ısı incelemesi yapılmıştır. Ansys Fluent v14.5 programı kullanılarak hava akışı simüle edilmiş, emici plakadan akışkana geçen ısı transferi miktarı belirlenmiştir. Modelleme iki boyutlu yapılmış ve ısı akışı olarak 910 W/m² sabit değer uygulanmıştır. Mevcut çalışma gösteriyor ki iki boyutlu sabit akışlı havalı güneş kolektörleri için en doğru sonuçları RNG k-epsilon türbülans modeli vermiştir.

Abdulalah ve ark. (2019) bu çalışmada, farklı parametrelerin düz plakalı güneş kolektörlerinin ısı verimine etkisini araştırmak için sayısal analiz kullanılmıştır. Geometrik özelliklerin ve çalışma koşullarının güneş kolektörlerinin ısı verimine etkisini

değerlendirmek için çeşitli geometriler incelenmiştir. Soğurucu kalınlığı, yükseltici konumu, boru kesitinin şekli, soğurucu malzeme, soğurucu, cam geçirgenliği ve kütle akış hızı gibi önemli parametreler incelenmiştir. Sonuçlar, soğurucu plakanın üstünde yükselticili kollektör veriminin, altta yükselticili kollektörden % 4.2 daha fazla olduğunu göstermiştir. Aynı zamanda, boru kesit geometrisinin verimlilik üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiş, dairesel borulara sahip kollektörlerin verimliliği % 38 iken üçgen kesitli kollektörün verimi % 34 olarak tespit edilmiştir. Güneş kollektörlerinin ısı veriminin; sıvı akış hızının, plaka emiciliğinin, soğurucu kalınlığının ve cam geçirgenliğinin artmasıyla arttığı tespit edilmiştir.

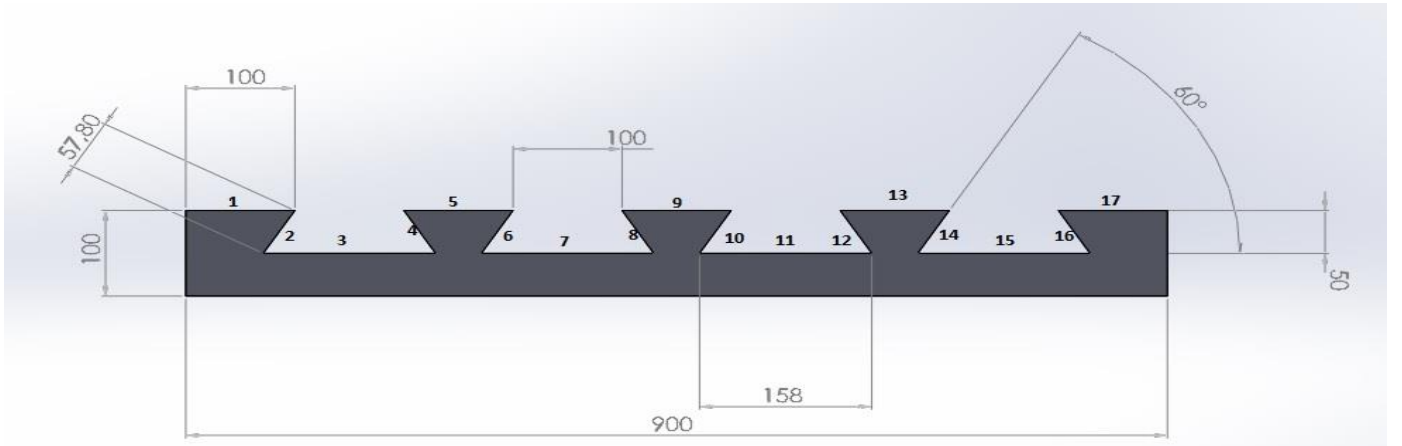
Serela ve ark. (2016) bu çalışmada, sıcak hava akışını kullanarak kurutmada kullanılan bir havalı güneş kollektörünün iki boyutlu sayısal simülasyonu yapılmıştır. Dolaylı güneş kurutucusu, Güneş Enerjisi Ekipmanları Geliştirme Biriminde (UDES) inşa edilmiştir. Bu çalışma ile amaçlanan türbülanslar oluşturmak için izole edilmiş duvarlara sabitlenmiş engelleri kullanarak havalı güneş kollektörünün içindeki ısı transferini iyileştirmektir. Engeller farklı açılarda (15° , 30° , 45° ve 60°) ve farklı sayıda (2, 4 ve 8) yerleştirilmiştir. Sistemin dinamik ve ısı davranışı incelenmiş ve analiz edilmiştir. Akışı tanımlayan diferansiyel denklemler, SIMPLEC algoritması ve k-epsilon türbülans modeli kullanılarak sonlu hacim yöntemi ile entegre edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda engellerin sayısının ve eğim açısının, ısı transferini kollektör çıkışındaki hava sıcaklığını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir.

1. Materyal ve Yöntem

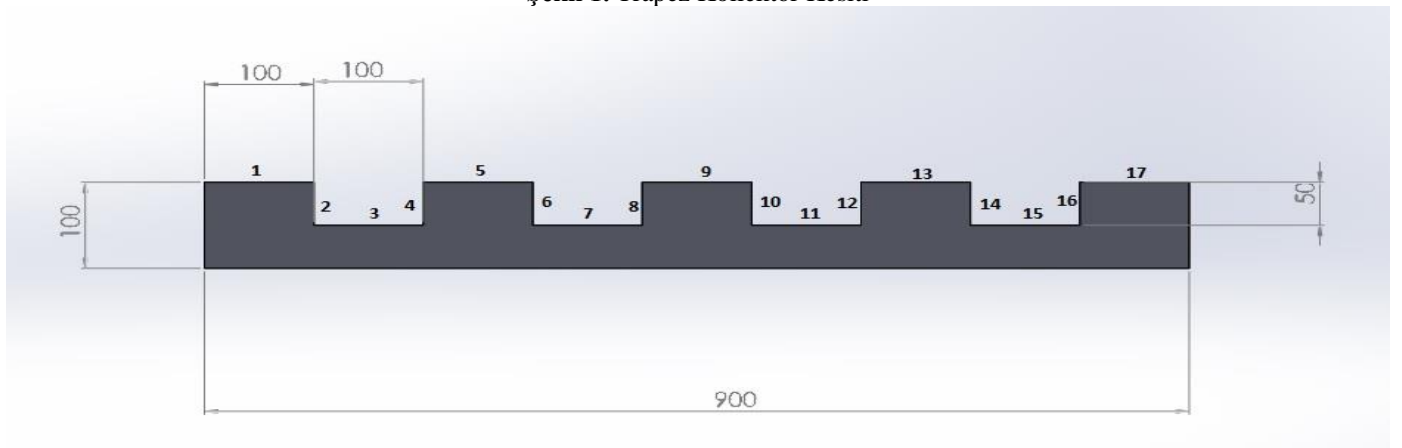
Bu çalışma kapsamında, Şekil 1 ve Şekil 2' de belirlenen iki farklı düz kollektör geometrisi için Optik Analiz Programı kullanılarak her bir yüzeye gelen anlık enerji miktarları bulunmuş, elde edilen veriler Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (ANSYS) Programında kullanılarak, kollektörden geçen suyun kollektör çıkışı sıcaklığı bulunmuştur. Burada gerçekleştirilen modelleme çalışmasında, Kırıkkale ili meteorolojik koşullarında, kollektörlerin yatay olarak yerleştirildikleri kabul edilmiştir. Ayrıca performans hesaplamalarında kullanılan meteorolojik değerler Temmuz ayı tipik günü için alınmıştır.

Optik Analiz Programında güneş modellemesi, dikdörtgensel bir ışık kaynağı olarak tasarlanabilmekte, programa girdi olarak, kaynağın içinde bulunduğu ortam özelliklerinin, kaynağın x, y, z koordinatlarındaki konumunun ve eksenlerle yaptığı açılarının, kaynaktan yapılan birim yüzey başına ışınımın gücünün, kaynağın saçılımının homojenliğinin tanımlanmasının, analizde ve görselde kullanılacak ışın sayısının tanımlanmasının yapılması gerekmektedir.

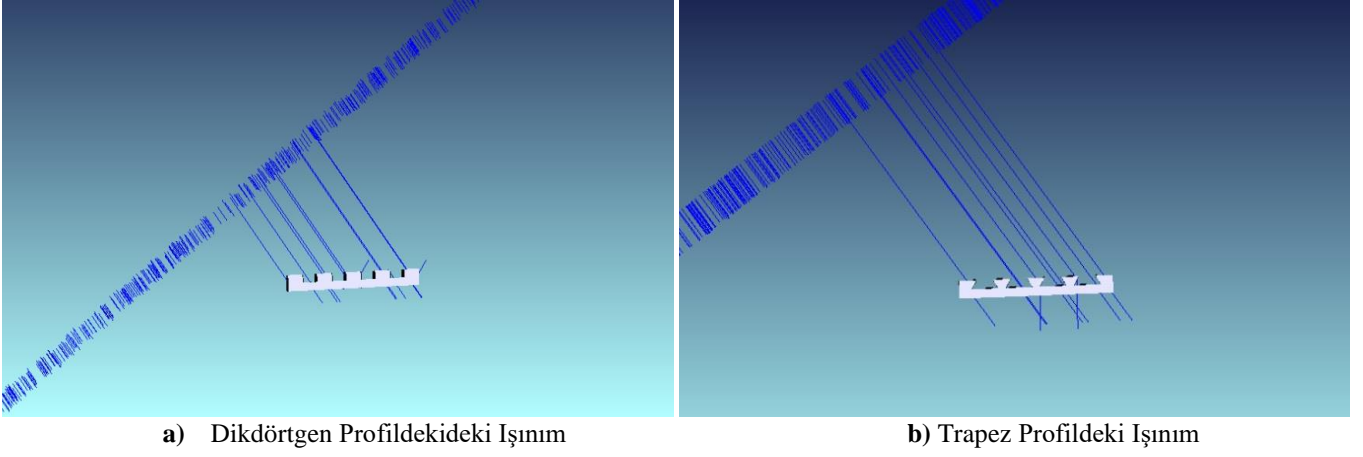
Güneş, 10x10 m boyutlarında bir kare ışın kaynağı olarak modellenmiş, güneşten gelen enerji 900 W/m^2 alınmış, güneş ışığının kollektör yüzeyiyle yaptığı zenit açısı 35° kabul edilmiştir. Kollektör uzunluğu 2000 mm olup, kesit ölçüleri Şekil 1 ve Şekil 2 de verilmiştir. Kollektör malzemesi 3 mm kalınlığında alüminyum, yüzey kaplaması nikel, yutma oranı 0,94 alınmıştır. Şekil 3' de güneş ışınımının geliş şekilleri verilmiştir.



Şekil 1. Trapez Kollektör Kesiti



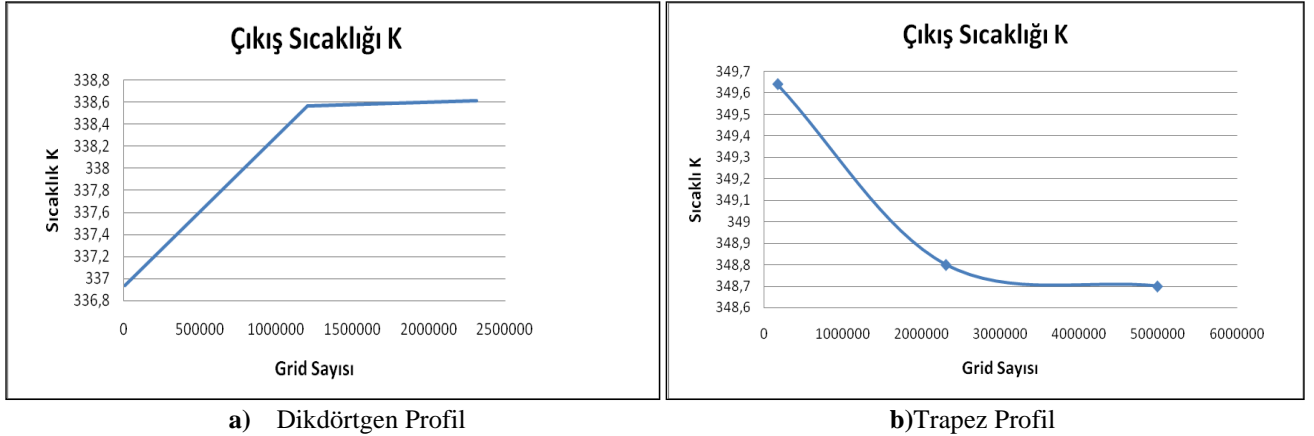
Şekil 2. Dikdörtgen Kollektör Kesiti



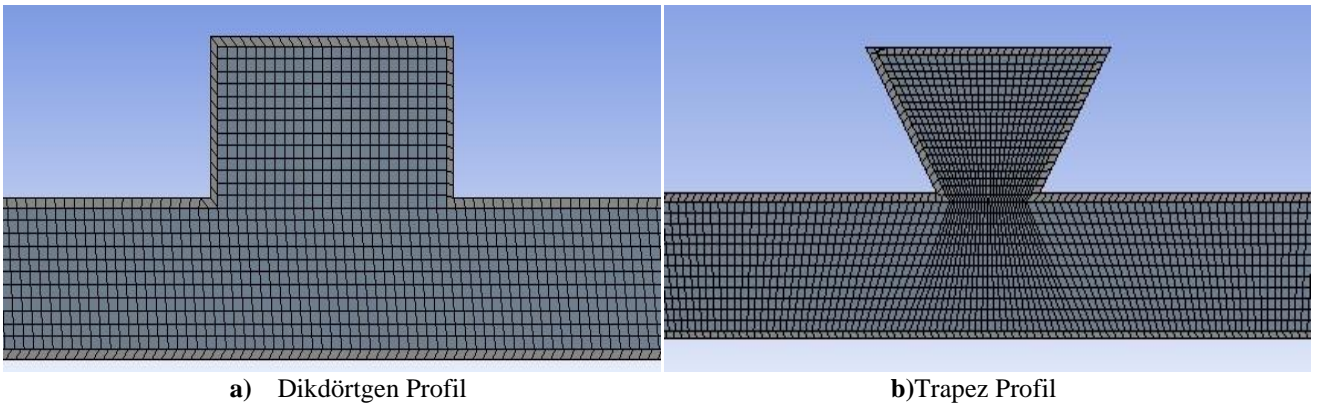
Şekil 3. Güneş Işınımının Kollektör Yüzeyi ile Yaptığı Açık ve Yansımaları a) Dikdörtgen Profildeki Işınım, b) Trapez Profildeki Işınım

Şekil 1 ve Şekil 2' de belirtilen numaralı yüzeylere gelen güneş enerji miktarları, nikel kaplı alüminyumun yutma katsayısı ile çarpılarak, ilgili yüzeylerde yutulan enerji miktarları elde edilmiştir. Ayrıca, birim m² için elde edilen bu değerler, ilgili yüzeylerin alan değerleriyle de çarpılarak, gelen ve yutulan toplam enerji miktarları bulunmuştur. Elde edilen değerler Çizelge 1 ve Çizelge 2'de verilmiştir. Bu çalışmada özellikle Dikdörtgen profil için sırasıyla 2,3,4,6,7,8,10,11,12,14,15,16 numaralı yüzeyler için bulunan enerji miktarları, yüzeyler arasındaki yansımaları dikkate alacak şekilde, optik analiz sırasında hesap edilmiştir. Yine aynı şekilde trapez profil için de benzer işlemler optik analiz aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

HAD analizinde elde edilen değerlerin gerçekliği için oluşturulan ağ yapısı büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle farklı Grid sayıları ile analizler tekrarlanarak en uygun ağ yapısı belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 4' de belirlenen Grid sayısına göre çıkış sıcaklıkları verilmiştir. Grid sayısı arttıkça sıcaklıkta ciddi bir değişim olmadığı görülmüştür. Dikdörtgen kolektör için 2312394, Trapez kolektör için 4994184 Grid sayısı oluşturulmuştur. Şekil 5' te her iki kolektör tipi için oluşturulan ağ yapısı verilmiştir.



Şekil 4. Kollektörlerde Oluşturulan Grid Sayısı a) Dikdörtgen Profil b) Trapez Profil



Şekil 5. Kollektörlerde Oluşturulan Ağ Sayısı a) Dikdörtgen Profil b) Trapez Profil

Optik analiz sonrası, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizi için sınır şartları belirlenmiştir. Dış ortam sıcaklığı 300 K, akışkanın kollektörlere giriş sıcaklıkları 290K, 300 K, 310K, 320K, akışkanın giriş debileri 1 kg/s, 0,1kg/s, 0,01 kg/s alınmıştır. Reynold sayısı hesaplanmış (1 kg/s, 0,1kg/s, 0,01 kg/s debiler için sırasıyla; Dikdörtgen profilli kolektör için 1844, 184,4, 18,44, Trapez profil için 1808, 180,8, 18,08) ve akış laminar olarak belirlenmiştir. Kolektörlerin yan yüzeylerinden ve alt yüzeyinden ısı girişi olmadığı varsayılmıştır. Kollektörün üst kısmındaki her bir yüzeye Optik Analiz Programında elde edilen değerler Çizelge 1 ve Çizelge 2' de ısı akısı sınır şartı olarak girilerek çözümlenmiştir.

2. Matematiksel Formülasyon

2.1. Reynold Sayısı Hesabı

HAD hesaplamalarında kullanılan Reynold sayısı hesabı eşitlik 1' de verilmiştir.

$$Re = \frac{\rho_{su} V_{su} D_h}{\mu_{su}} \quad (1)$$

Yukarıdaki eşitlikte görülen D_h akışın hidrolik çapıdır ve eşitlik (2) aracılığı ile elde edilmektedir. Burada, P akışkanın geçtiği ıslak çevreyi A_c ise akışkanın geçtiği kesit alanını temsil etmektedir. Eşitlik 3 ile hesaplanan ortalama hız (V_{su}) ile Reynold sayısı hesabı yapılır (Çengel ve Cimbala, 2006).

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (2)$$

$$\dot{m}_s = \rho V_{su} A_{kanal} \quad (3)$$

2.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Temel Denklemleri

Sistem olarak ele alınan hacimde tanımlanan problemlerin akış ve ısı transferi davranışlarının sayısal olarak incelenmesi için, HAD 'nin temel denklemlerinin uygun şekilde kabul edilen sınır şartlarına göre çözülmesi gerekmektedir. Bu temel denklemler kütle korunumu (süreklilik), momentum korunumu ve enerji korunumu kanunlarından türetilerek genelde Navier-Stokes denklemleri olarak adlandırılmaktadır. Momentum korunumu Newton'un ikinci yasası ve enerji korunumu termodinamiğin birinci yasası olarak da bilinmektedir (Üçler K. 2019).

2.2.1. Kütle korunumu denklemi

Süreklilik denklemi olarak da ifade edilen denklem, kontrol hacmi içindeki kütle zamanla bağlı olarak değişim hızı ile kontrol yüzeyinden olan net kütle geçişinin toplamının sıfıra eşit olduğunu ifade etmektedir. Bu ifade Denklem (4)'de görülmektedir;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (4)$$

Denklemden; (ρ) akışkanın yoğunluğunu, (t) zamanı, (\vec{v}) hız vektörünü temsil etmektedir. Hız vektörünün diverjansını açık bir şekilde yazdığımızda Denklem (5) elde edilir;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

Denklemden; (ρ) akışkanın yoğunluğunu, (t) zamanı, (\vec{v}) hız vektörünü, (u) , (v) ve (w) sırasıyla x , y ve z yönlerindeki hız bileşenlerini ifade etmek için kullanılan sembollerdir (Üçler K. 2019).

2.2.2. Momentumun korunumu denklemi

Newton'un İkinci Kanunu'ndan elde edilen momentumun korunumu denklemi, bir sisteme etkiyen dış kuvvetler toplamının sistemin momentumunun birim zamanda değişimine eşitliğini ifade etmektedir. Bu eşitlik Denklem (6)'da görüldüğü gibidir (Üçler K. 2019);

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \quad (6)$$

2.2.3. Enerjinin korunumu denklemi

Termodinamiğin birinci kanunundan türetilen enerji denklemi ele alınan sistemde toplam enerjinin sisteme giren ve sistemden çıkan net ısı ile sistemde tüketilen ve sistemde üretilen net işin toplamına eşit olmasını ifade eder. Bu ifade Denklem (7)'de verilmiştir (Üçler K. 2019);

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [u_j (\rho E + P)] = - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \dot{c} \left(\frac{u_j \sigma_{ij}}{dx_j} \right) \quad (7)$$

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, HAD analizinde belirlenen bütün parametreler için çözümlenmiştir ve elde edilen veriler aracılığı ile kollektördeki sıcaklık dağılımı elde edilerek, kollektör çıkışında sıcaklık dağılımı bulunmuştur. Elde edilen sonuçların bir kısmı aşağıda verilmiştir.

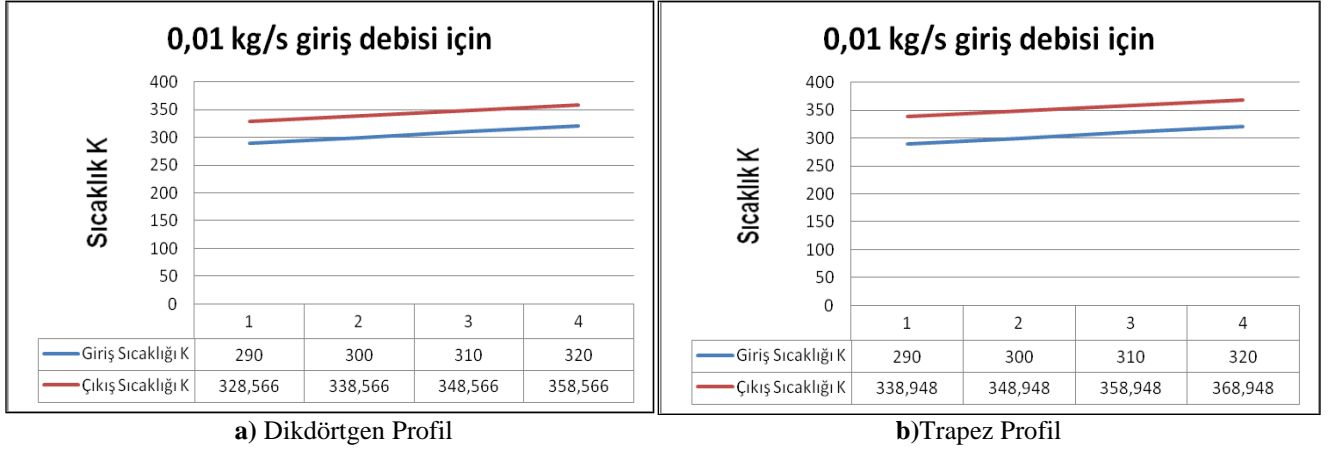
Çizelge 1: Dikdörtgen Profil için Optik Analiz Programından Alınan Güneş Enerjisi Miktarları

Dikdörtgen profildeki yüzey numaraları	Yüzey alanı (m ²)	Yüzeğe gelen enerji akısı (W/m ²)	Yüzeyde yutulan enerji akısı (W/m ²)	Yüzeyde yutulan toplam enerji (W)
1	0,2	736	691,8	138,68
2	0,1	257	241,6	24,16
3	0,2	530,2	498,4	99,68
4	0,1	515,6	484,66	48,47
5	0,2	736	691,8	138,37
6	0,1	589,2	553,85	55,38
7	0,2	604,2	567,76	113,59
8	0,1	515,6	484,66	48,47
9	0,2	736	691,8	138,37
10	0,1	589,1	553,75	55,38
11	0,2	604,25	567,76	113,6
12	0,1	515,8	484,85	48,49
13	0,2	735,6	691,5	138,27
14	0,1	588,7	553,4	55,34
15	0,2	603,85	567,6	113,52
16	0,1	515	484,1	48,4
17	0,2	736	691,8	138,37
Toplam	2,6			1516,54

Çizelge 2. Trapez Profilde Optik Analiz Programından Alınan Güneş Enerjisi Miktarları

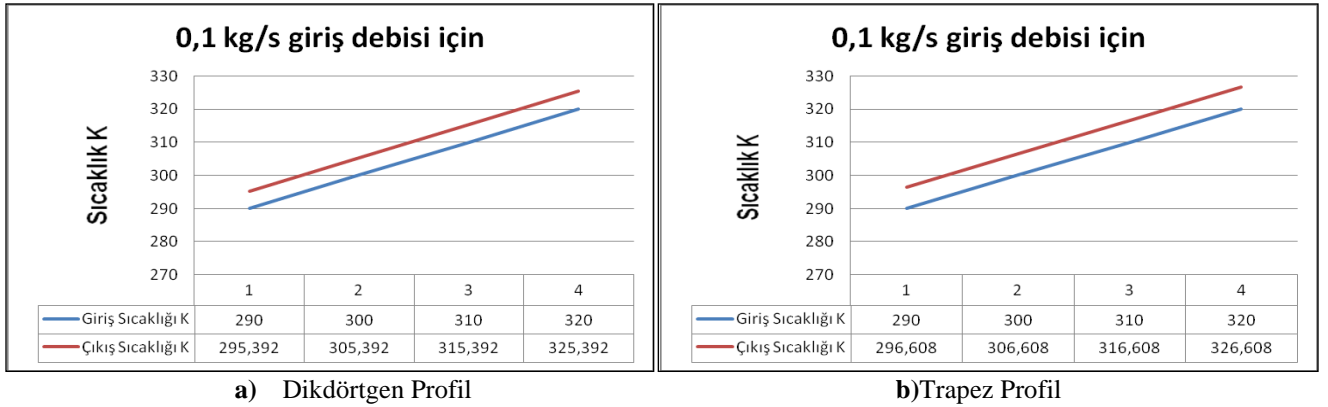
Trapez profildeki yüzey numaraları	Yüzey alanı (m ²)	Yüzeğe gelen enerji akısı (W/m ²)	Yüzeyde yutulan enerji akısı (W/m ²)	Yüzeyde yutulan Toplam enerji(W)
1	0,2	735,5	691,4	138,27
2	0,1156	598,6	562,7	65,05
3	0,316	690,8	649,35	205,2
4	0,1156	80,6	75,78	8,76
5	0,2	883	830	166
6	0,1156	657,4	618	71,44
7	0,316	716,45	673,46	212,8
8	0,1156	116,35	109,37	12,64
9	0,2	882	829	165,8
10	0,1156	724	680,6	78,68
11	0,316	716	673,2	212,7
12	0,1156	116,6	109,6	12,67
13	0,2	873	820,6	164,12
14	0,1156	724,9	681,4	78,77
15	0,316	716,77	673,77	212,9
16	0,1156	114,88	108	12,48
17	0,2	736	691,84	138,3
Toplam	3,1888			1956,64

Şekil 6a ve 6b’de, nikel kaplamalı alüminyum malzemeden yapılmış kollektöre giren akışkan debisi 0,01 kg/s için, kollektör su çıkış sıcaklığının su giriş sıcaklığı ile değişimi verilmiştir. Dört farklı giriş sıcaklığı için Şekil 6a ve 6b incelendiğinde, çizilen eğrilerin birbirine oldukça benzer davranış sergilediği görülmektedir. Genel olarak, artan su giriş sıcaklığı ile çıkan suyun sıcaklığı için çizilen çizgiler benzer oranda artış göstermektedir. Çıkış sıcaklıkları incelendiğinde trapez tipin sıcaklık değişimi dikdörtgen tipe göre %3 daha fazladır.



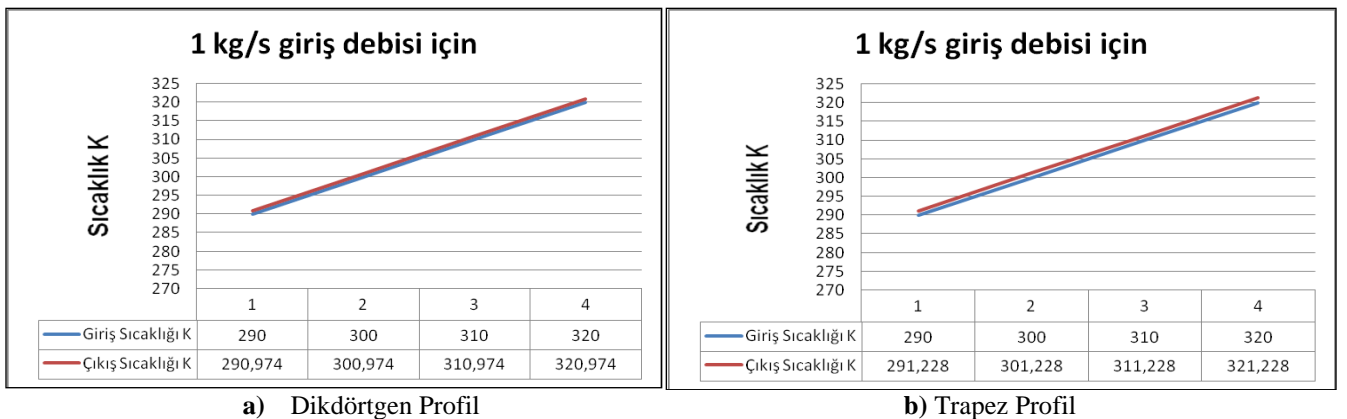
Şekil 6. Kollektörlerden Çıkan Suyun Sıcaklığı a) Dikdörtgen Profil b) Trapez Profil

Şekil 7a ve 7b' de, kollektöre giren akışkan debisi 0,1 kg/s için, kollektör su çıkış sıcaklığının su giriş sıcaklığı ile değişimi verilmiştir. Dört farklı giriş sıcaklığı için Şekil 7a ve 7b incelendiğinde, çizilen eğrilerin aynı şekilde birbirine oldukça benzer davranış sergilediği görülmektedir. Genel olarak, artan su giriş sıcaklığı ile çıkan suyun sıcaklığı için çizilen çizgiler benzer oranda artış göstermektedir. Ancak giriş debisi arttıkça, akışkana geçen ısı miktarı artış göstermesine rağmen çıkış sıcaklıkları azalmaktadır. Çıkış sıcaklıkları incelendiğinde ise trapez tipin sıcaklık değişimi dikdörtgen tipe göre % 0,4daha fazla olmuştur.



Şekil 7. Kollektörlerden Çıkan Suyun Sıcaklığı a) Dikdörtgen Profil, b) Trapez Profil

Şekil 8a ve 8b' de, kollektöre giren akışkan debisi 1 kg/s için, kollektör su çıkış sıcaklığının su giriş sıcaklığı ile değişimi verilmiştir. Dört farklı giriş sıcaklığı için Şekil 8a ve 8b incelendiğinde, çizilen eğrilerin aynı şekilde birbirine oldukça benzer davranış sergilediği yine görülmektedir. Genel olarak, su giriş sıcaklığı artışı ile çıkan suyun sıcaklığı için çizilen çizgiler benzer oranda artış göstermektedir. Ancak giriş debisindeki miktarı arttırdıkça akışkana geçen ısı miktarları diğer debilere göre daha fazla olmasına rağmen çıkış sıcaklığındaki değişim çok düşüktür. Bu nedenle çıkış sıcaklıkları incelendiğinde trapez tipin giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki fark ile dikdörtgen tipin sıcaklık farkı çok düşük seviyelere gelmektedir. Genel olarak geometrilere bakacak olursak, trapez tipteki çıkış sıcaklığı dikdörtgen tipin çıkış sıcaklığına göre % 0,08fazla olmaktadır. Dikdörtgen kollektörde z koordinat eksenini boyunca Nusselt Sayısı 0 ile 40 arasında değişim göstermiş, Trapez kollektörde ise z koordinat eksenini boyunca Nusselt Sayısı 0 ile 45 arasında değişim göstermiştir.



Şekil 8. Kollektörlerden Çıkan Suyun Sıcaklığı a) Dikdörtgen Profil, b) Trapez Profil

2. Sonuç

Bu çalışma kapsamında, belirlenen iki farklı tip emici yüzey geometrisine sahip kolektörlerin sayısal hesaplar için modellemeleri yapılmış, optik analiz programı ile kolektörlerin her bir yüzeyine gelen güneş enerjisi miktarları bulunmuş ve HAD analizi yapılarak, kolektörlerin değişik kesitleri için, farklı giriş debileri ve sıcaklıkları için çıkış sıcaklıkları elde edilmiştir. Debi miktarının artırılması ile çıkış sıcaklıklarının düştüğü tespit edilmiştir. Yapılan çözümlerinde açılı yüzeye sahip trapez tip kolektörde daha fazla enerjinin yutulduğu görülmüştür. Sayısal olarak, dikdörtgen profile sahip kolektörde, 1516,54 W'lık bir yutulma ortaya çıkarken, trapez profil için bu değer 1956,64 W olmuştur. Profilin olmadığı aynı dış boyutlara sahip düz bir kolektör için söz konusu değer 1245,31 W olacağı dikkate alındığında, kolektör yüzeyinde geliştirilen profillerin, profil içersine giren güneş ışınımının yansımalarından da yutulmaların gerçekleştiği profil içi yüzeyler nedeniyle, kolektör verimini artırıcı bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Referanslar

- Abdulalah, Amira & Misha, Suhaimi & Tamaldin, Noreffendy & Mohd Rosli, Mohd Afzanizam & Mohd Rosli, Zulkifli & Sachit, Fadhil. (2019). A Review: Parameters Affecting the PVT Collector Performance on the Thermal, Electrical, and Overall Efficiency of PVT System. 10.13140/RG.2.2.36034.53444.
- Abuşka M., ve Akgül M., B. (2014). “Güneş Enerjili Hava Kolektöründe Selektif Boya Kullanımının Isıl Verime Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi” M. ABUSKA et al./ ISITES2014 Karabük – TURKEY sf. 1595 – 1602
- Abuşka M. vd.(2015). “Konik Yüzey Geometrilili Güneş Enerjili Hava kolektörünün Dikey Uygulamasında Isıl Verim Analizi” ULUBTK’15 20. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 02-05 Eylül, Balıkesir.
- Amraoui, M. A., Aliane, K. “Three-dimensional Analysis of Air Flow in a Flat Plate Solar Collector”, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 62(2), pp. 126-135, 2018. <https://doi.org/10.3311/PPme.11255>
- Atıcı M. (2006). “Değişik Yüzey Geometrilere Sahip Güneş Kolektörlerinde Isı Transferi ve Basınç Kayıplarının Deneysel Olarak Hesaplanması” Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı.
- Balotak H. K., Said M.H. (2017).“Dikdörtgen kanallarla Çift Amaçlı Güneş Kolektörünün Deneysel Olarak incelemesi” Journal of Thermal Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 1052-1059, January, ManuscriptReceived 21 January 2016, Accepted 01 July 2016, Yıldız Technical University Press, Istanbul, Turkey.
- Çengel, Y. A., &Cimbala J. M. (2006). Fluid Mechanics Fundamentals and Applications (1st. ed.). New York, McGraw-Hill.
- Kumar, Dr & Mahato, Abhijit & Behura, Arun. (2017). CFD Analysis of Solar Air Heater Having Corrugated Absorber Plate. International Journal of emerging technology and advanced engineering. 9001. 575-587.
- Medina, D. M., e tal. (2016). Finite element analysis of a solar collector plate using two plate geometries. Ingeniería e Investigación, 36(3), 95-101. DOI: 10.15446/ing.investig.v36n3.56071
- Özdemir M. B. vd.(2017). “Farklı Soğurucu Yüzey Tiplerine Sahip Düzlemsel Kolektörlerin Deneysel Analizi” Politeknik Dergisi, 20 (2) : 441-449
- Özkaya M. G. vd.(2007). “Düzlemsel Güneş Kolektörlerinde Farklı Profillerdeki Emici Plakaların Deneysel İncelenmesi” POLİTEKNİK DERGİSİ, CİLT 10, SAYI 2
- Serale, Gianluca & Goia, Francesco & Perino, Marco. (2016). Numerical model and simulation of a solar thermal collector with slurry Phase Change Material (PCM) as the heat transfer fluid. Solar Energy. 134. 429-444. 10.1016/j.solener.2016.04.030.
- Şahin T. (2010) “Düzlemsel ve Bükülmüş Kolektörlerinin Deneysel İncelemesi” Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitim Anabilim Dalı.
- ÜÇLER K., “Güneş Enerjisinin Mekan Isıtması Amacıyla Duyulur Isı Depolama Malzemelerinde ve Faz Değiştiren Maddelerde Depolanmasının İncelenmesi” Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 2019



Kardan Şaftı Mukavemet ve Yorulma Ömür Analizi Örnek Uygulaması: 4x2 Ticari Araç Kardan Şaftı

Strength and Fatigue Life Analysis Study of Cardan Shaft A Case Study: 4x2 Commercial Vehicle Cardan Shaft

Can Çivi¹, Necati Tahralı¹

¹Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü. 45140 Manisa, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 15/10/2020

Kabul / Accepted: 28/01/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 29/01/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Kardan şaftı, mekanik gücü ve torku iki komponent arasında iletmek için kullanılan, dinamik gerilmeler altında zorlanan kritik bir aktarma organıdır. Yorulma, kardan şaftlarının en temel hasar mekanizmalarından biridir. Bu sebeple yorulma ömrü hesapları, kardan şaftı tasarımlarında çok büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada, endüstriyel olarak hali hazırda üretimi gerçekleştirilen bir taşıt kardan şaftının seçilen dört farklı kritik elemanın mukavemet ve ömür analizleri Gerilme-Ömür (S-N) diyagramı ve yorulma faktörlerinin bir arada hesabıyla gerçekleştirilmiştir. Şaftın seçilen kritik elemanlarının dinamik kuvvet altındaki emniyet katsayısı ve ömür değerleri analitik olarak hesaplanmıştır. Ayrıca yapılan hesaplamalar, deneysel yorulma analizi ve hasar verileri ile karşılaştırılıp değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Güvenilirlik, ömür analizi, kardan şaftı, dinamik gerilme”

Abstract

A cardan shaft is a critical drivetrain that is forced under dynamic stresses to transmit mechanical power and torque between two components. Fatigue is one of the main damage mechanisms of cardan shafts. For this reason, fatigue life calculations are of great importance in cardan shaft designs. In this study, the strength and life analyze of four different critical elements of a vehicle cardan shaft, which is currently manufactured industrially, were performed using the Stress-Life (S-N) diagram and fatigue factors. The safety coefficient and lifetime values of the selected critical elements of the shaft under dynamic force have been calculated analytically. Also, the calculations made were compared with experimental fatigue analysis and damage data and evaluated.

Key Words

“Reliability, life analysis, cardan shaft, dynamic stress”

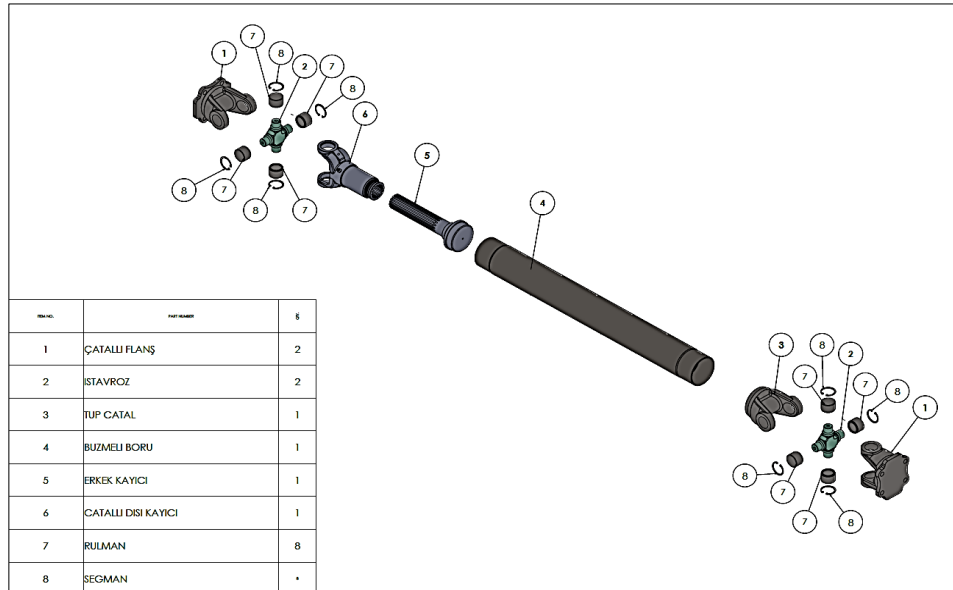
1. Giriş

Kardan şaftı gücü ve dönme hareketini motordan tekerleklere ileten dönen bir elemandır. Kardan şaftında vites kutusu ile diferansiyel arasındaki sürekli değişen açılarda ve dinamik gerilmeler altında çalışma zorunluluğu bulunmaktadır (Elanchezhian, Vijaya Ramnath, Sripada Raghavendra, Muralidharan, & Rekha, 2018; Hu, Zhang, & Tan, 2020). Kardan şaftları universal mafsal bağlantıları ile farklı düzlem ve eksenlerde bulunan miller arasında hareket iletimine olanak sağlarken, mil eksenlerinin belirli sınırlar içerisinde yer değiştirmesinden etkilenmeden çalışmaya devam edebilir (Hummel & Chassapis, 2000). Kardan şaftları, bu açısal sapmaları karşılayabilmek için birbirine yakın yerleştirilmiş, 90° açıyla yönlendirilmiş istavroz denilen mafsallar içeren bir çift menteşeden oluşan ve bu sayede güç ileten milin herhangi bir yönde açı yapmasına izin veren, bir makine elemanıdır. Bu durum kardan şaftında giriş tahrik mili sabit bir hızda döndüğünde bile, çıkış tahrik milinin değişken bir hızda dönmesine ve bu sebeple değişken yüklere beraber aynı zamanda aşınmaya neden olur (Vesali, Rezvani, & Kashfi, 2012). Tahrik edilen şaftın hızındaki değişim, eklem konfigürasyonuna bağlıdır. Böyle bir konfigürasyon üç değişkenle belirtilebilir. Kardan şaftları, yüksek dinamik burulma ve kayma gerilmelerine maruz bırakan torku ve gücü iletmek için kullanılır (Nadeem, Giridhara, & Rangavittal, 2018). Dinamik gerilmeler altında çalışan makine parçalarında meydana gelen temel hasar mekanizması yorulma hasarıdır (Santecchia et al., 2016). Yorulma, kardan şaftları için de en temel hasar mekanizmalarından biridir (Göksenli & Eryürek, 2009). Kardan şaftlarında özellikle istavroz adı verilen elemanlarda ve bu elemanların üzerinde olan rulmanlarda yorulma hasarı meydana gelmektedir. Bununla beraber dinamik gerilmeler altında çalıştığı için şaftın tüm elemanlarında yorulma hasarı söz konusu olabilmektedir (Palma et al., 2017). Yorulma hasarı çok az plastik şekil değişimi içerdiğinden ve ani kırılmalara yol açtığından tasarımlar için önemli risk oluşturan bir hasar mekanizmasıdır (Guo, Mao, Liu, & Liang, 2019). Wöhler yorulma ile ilgili spesifik araştırmalar yapan ilk bilim adamı olarak bilinmektedir ve araştırmalarında demiryolu araçlarındaki şaftlarda meydana gelen kırılmaları incelemiştir. Yorulma anlamındaki temel literatür bu çalışmalar ile ortaya çıkmıştır. Bu çalışmalarda ortaya koyulan temel olgular günümüzde de yapılan çalışmaların temelini oluşturmaktadır. (Köhler, Jenne, Pötter, & Zenner, 2017; Marczewska et al., 2006). Malzemelerin ve makine parçalarının yorulma davranışları yorulma ömür (S-N) eğrileri ile belirlenmektedir (Toasa Caiza & Ummerhofer, 2018). Logaritmik ölçekte çizilen bu eğrilere çeşitli ömür faktörlerinin de dahil edilmesi ile makine parçalarının logaritmik ömür denklemleri elde edilebilmektedir ve çeşitli makine parçalarında bu denklemlerin ömür tespitinde başarılı şekilde kullanıldığı belirlenmiştir (M. Bayraktar & Tahralı, 2009; Meral Bayraktar, Guclu, & Tahralı, 2014; Meral Bayraktar, Tahralı, & Guclu, 2010; Dikmen, Bayraktar, & Guclu, 2012; Tahralı, Atik, & Çivi, 2017). Kardan şaftı ile ilgili literatürde bulunan güncel çalışmalar incelendiğinde, genellikle çalışmaların şaftın kompozit malzemelerden üretilerek araç ağırlıklarının azaltılması amacıyla yoğunlaştığı görülmektedir (Badie, Mahdi, & Hamouda, 2011; Henry, Bakis, & Smith, 2015; kishore, Keerthi, & kumar, 2016). Kardan şaftlarının ömür ve mukavemet analizleri ile ilgili hem ticari gizlilik hem de karmaşık hesap bağıntıları sebebiyle sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır (Bayrakceken, Tasgetiren, & Yavuz, 2007; Palma et al., 2017; Sener, 2016). Bu çalışma kapsamında, hali hazırda üretimi mevcut olan ve bir ticari araçta kullanılan kardan şaftı belirlenmiş, şaftın seçilen kritik elemanlarının mukavemet, ömür ve güvenilirlik analizi hesapları yorulma ömür (S-N) diyagramı ve Soderberg denklemleri vasıtası ile gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

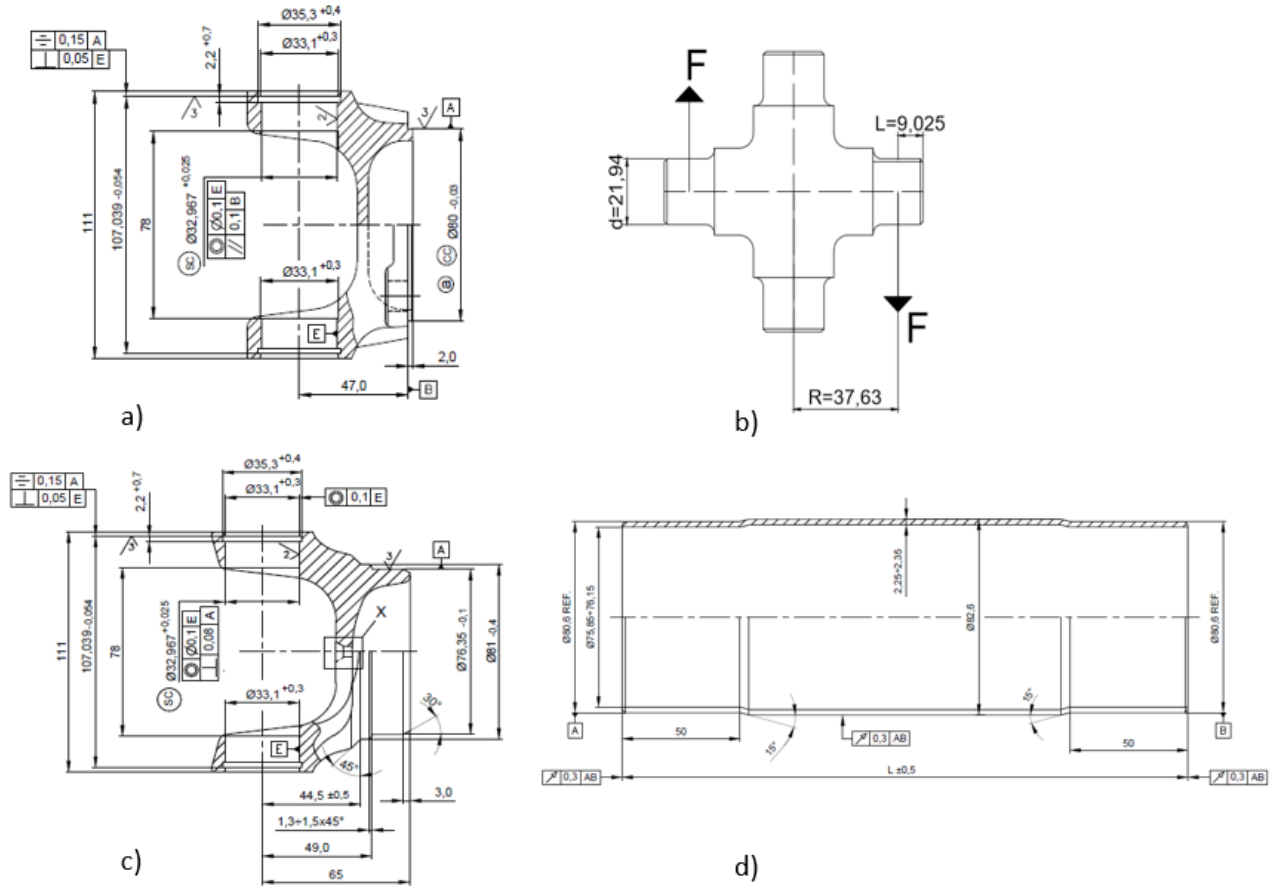
2.1. Materyal

Çalışmada, arkadan itişli 4x2 ticari bir midibüste kullanılan kardan şaftı temel alınmıştır. Ticari gizlilik dolayısıyla araç marka ve şaftın üretici detayları, verileri paylaşan firmanın talebi üzerine gizli tutulmuştur. Analiz yapılan şaftın 3D çizimi şematik olarak Şekil 1'de görülmektedir. Çalışmada, şaftın statik ve dinamik laboratuvar testi hasar verileri başlangıç olarak temel alınmıştır. Destek sağlayan şaft üretici kuruluşun statik burulma deneyinde ve burulmalı yorulma test deneylerinde elde ettiği verilerden, hasara uğraması muhtemel olan kritik şaft unsurlarının tespitinde yararlanılmıştır. Şaftta hesap gerçekleştirilecek kritik elemanların tespitinde yararlanılan bir diğer husus aynı kuruluşun gerçek saha hasar verileri olmuştur. Bunlarla beraber hesaplanan elemanların seçiminde son faktör; çok sayıda parçadan oluşan şaft elemanları içerisinde tasarım iyileştirilmesi yapılabilecek veya tasarımına doğrudan müdahale edilebilecek olan unsurlardır. Saha verilerinin elde edilmesinde, üretici firmanın istatistikî verilerinden ve raporlamalarından ile firmaya yapılan müşteri geri bildirimlerinden yararlanılmıştır. Tüm bu süzme işlemlerinden sonra seçilen elemanlar Şekil 1'de ilk 4 maddede ifade edilen çatallı flanş, istavroz, tüp çatal ve büzmelî boru olarak adlandırılacak olan elemanlardır. İstavroz bu elemanların içerisinde test ve veriler doğrultusunda en kritik elemandır.



Şekil 1. Analiz yapılan kardan şaftı

Hesaplaması gerçekleştirilen elemanların resimleri Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Mukavemet ve ömür hesapları gerçekleştirilen elemanlar a) Çatallı flanş, b) İstavroz, c) Tüp çatal, d) Büzmeli boru
Analitik hesaplarda kullanılan aracın verileri Tablo 1’de yer almaktadır.

Tablo 1. Araç Verileri

Azami Motor Gücü	140 kW
Optimum Motor Devri	2600 rpm
Vites Kutusu Kademe Verimi	%96,5

Aracın vites çevrim oranları Tablo 2’de yer almaktadır.

Tablo 2. Vites Çevrim Oranları

Vites	1	2	3	4	5	6
Çevrim Oranı	6,369	3,767	2	1,355	1	0,782

Tablo 1 ve Tablo 2 vasıtasıyla elde edilen ve kardan şaftına etki eden maksimum moment değerini oluşturan moment değerleri Tablo 3’te verilmektedir.

Tablo 3. Kardan Şaftına Etkiyen Maksimum Burulma Momenti Değerleri

1. Vites	$M_{b(1)} = 3049,888$ [Nm]
2. Vites	$M_{b(2)} = 1803,882$ [Nm]
3. Vites	$M_{b(3)} = 957,729$ [Nm]
4. Vites	$M_{b(4)} = 648,861$ [Nm]
5. Vites	$M_{b(5)} = 478,864$ [Nm]
6. Vites	$M_{b(6)} = 388,053$ [Nm]

2.2. Metot

Makine parçalarının mukavemet hesaplarında genel olarak ilgili standartlar ile beraber Soderberg, Goodman, Gerber, ASME-eliptik ve akma denklemleri kullanılmaktadır (Shigley, 2011). Bu çalışmada, hesaplamalarda malzeme ve hesap unsurları göz önüne alınarak Soderberg denklemleri seçilmiştir. Kullanılan temel denklem (1) de görülmektedir. Denklemde σ_m ortalama gerilme, σ_a gerilme genliği, σ_y akma gerilmesini ve S emniyet katsayısını ifade etmektedir.

$$\sigma_m + \frac{(\sigma_y)}{(\sigma_e')} \cdot \sigma_a = \frac{(\sigma_y)}{S} \quad (1)$$

Denklemde σ_e' ifadesi ilgili elemanın sürekli mukavemet sınırını ifade eder. Bu değer, yorulma faktörlerinin malzemenin sürekli mukavemet sınırına etki ettirilmesiyle belirlenir (Akkurt, 2012; Shigley, 2011). Makine parçalarının sürekli mukavemet değeri hesaplarında malzeme (K_m), boyut (K_b), yüzey (K_a) sıcaklık (K_d) yükleme faktörü (K_c), güvenilirlik faktörü (K_r) ve korozyonu da içeren diğer faktörler (K_e) gibi yorulma faktörlerinin etki ettirilmesi bir zorunluluktur (Shigley, 2011). Bu faktörler ile hesaplarda kullanılan sürekli mukavemet sınırı ve σ_e' ile ifade edilmektedir.

$$\sigma_e' = \frac{K_m \cdot K_b \cdot K_a \cdot K_d \cdot K_c \cdot K_r \cdot K_e}{K_f} \cdot \sigma_e = K \cdot \sigma_e \quad (2)$$

Sonuç olarak yorulma faktörlerinin etkisi ile (2) eşitliği elde edilir. Mukavemet hesaplarında (1) ve (2) eşitliği temel alınmıştır. Hesaplarda elemanın üzerine gelen gerilme türü ve elemanın kesitine göre gerilme değerleri tespit edilerek (S) emniyet katsayıları bileşik gerilmeye göre belirlenmiştir. Hesaplarda gerekli sürekli mukavemet değeri eldesi için (Niemann, G. & H., Höhn, 1975) kaynağı kullanılmıştır. Yorulma faktörlerinin seçiminde bu faktörü içeren tabloların yer aldığı kaynaklardan yararlanılmıştır (Akkurt, 2012; Shigley, 2011). Her bir elemanın malzemeleri ve hesap faktörleri Tablo 4-7’de verilmiştir. Yorulma faktörlerin çarpımı olan K değeri ortalama olarak üç eleman için de 0,59 olarak belirlenmiştir.

Tablo 4. Çatallı Flanş Hesap Bilgileri

Malzeme	C45
σ_y	430 N/mm ²
σ_u	735 N/mm ²

Tablo 5. İstavroz Hesap Bilgileri.

Malzeme	AISI 5120 (20MnCr5)
σ_y	540 N/mm ²
σ_u	1000 N/mm ²
α_{12} (Mafsal açısı)	20°
$i_{(12)\text{maks}} = \cos\alpha_{12}$ (maksimum iletim oranı)	0.939
$i_{(12)\text{min}} = 1/\cos\alpha_{12}$ (minimum iletim oranı)	1.064

Tablo 6. Tüp Çatal Hesap Bilgileri.

Malzeme	AISI 1330 (30Mn5)
σ_y	490 N/mm ²
σ_u	870 N/mm ²

Tablo 7. Büzmeli Boru Hesap Bilgileri.

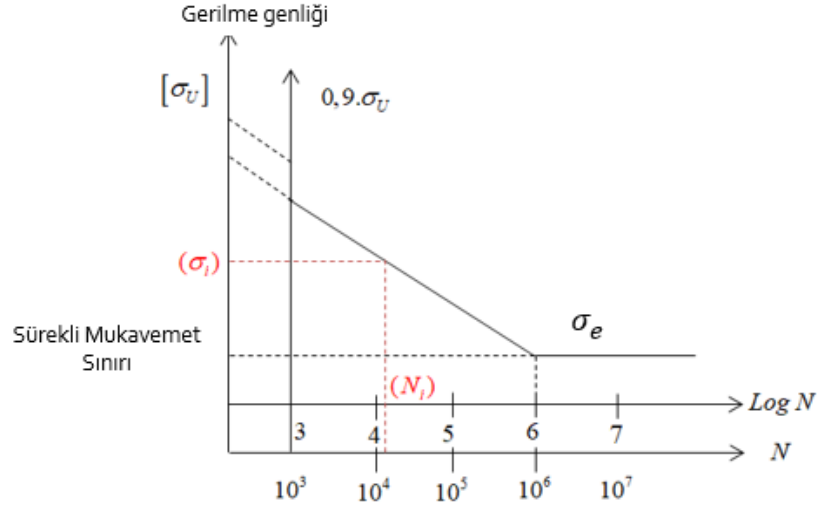
Malzeme	Ck45
σ_y	500 N/mm ²
σ_u	700 N/mm ²

Elemanlar ayrı ayrı değerlendirildiğinde, çatalı flanşın mukavemet hesabında; meydana gelen kulak dibi çatlakları ve vida bağlantı bölgelerinde meydana gelen hasar nedeniyle kritik parça olarak hesap bağıntısında bu kısımlar ele alınmıştır. Bu kısımlarda eğilme ve kayma gerilmesinin oluşturduğu bileşke gerilme esaslı hesaplar gerçekleştirilmiştir. Bileşik gerilme hesabı Von-Misses bağıntısı ile yapılmıştır (3). Şaft malzemesi ye yükleme faktörleri için en uygun yöntemin Von-Misses bağıntısı olduğu ilgili literatürden görülmüştür (Shigley, 2011; Sines & Ohgi, 2016). Kardan mili üzerinde en yüksek gerilmelerin olduğu parça istavrozdur. Hasarlar da genel olarak bu eleman üzerinde oluşur (Tanik, Parlaktaş, Tanik, & Kadioğlu, 2015). İstavroz hesabında da eğilme ve kesme gerilmelerine göre bileşik gerilme hesabı uygulanarak çözüm gerçekleştirilmiştir. Üçüncü kritik parça olan tüp çatalda özellikle kulakların iç yüzeylerinde ve kulakların diplerinde hasar olduğu bilinmektedir. Bu sebeple bu eleman için de kritik noktaların eğilme ve kesmeye göre bileşke momenti hesabı gerçekleştirilmiştir. Son incelenen parça olan büzmeli boru kısmında ise mukavemet hesabında, yalnız burulma gerilmesi göz önüne alınmıştır. Bu parçada da kritik kesit için mukavemet hesabı gerçekleştirilmiştir. Tüm mukavemet hesapları titreşimli (dalgalı) genel değişken gerilme göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir.

$$\sigma' = (\sigma^2 + 3\tau^2)^{1/2} \quad (3)$$

Mukavemet analizinde emniyet kat sayıları (S) hesaplanmıştır. Maksimum dinamik gerilmeler, maksimum momentin eğilme ve burulma kesit mukavemet momentine bölünmesi ile elde edilmiş, eğilme ve burulma bileşke gerilmeleri Denklem (3)'ten Von Misses bağıntısından bileşke olarak hesaplanıp, ilgili elemanın akma mukavemet değeri ile kıyaslanarak emniyet kat sayıları tespit edilmiştir.

Mukavemet hesaplarının yanı sıra kardan şaftı gibi dinamik gerilme altında çalışan makine parçalarının ömür değerlendirmelerin gerçekleştirilmesi bir zorunluluktur (Zahavi & Torbilo, 1996). Tekrarlı gerilmeler altında çalışan bu tür makine elemanlarında akma gerilmelerin altında meydana gelen yorulma hasarları sonucu meydana gelecek kırılmanın zamanının tahmini büyük önem taşır (Khurmi & Gupta, 2005; Zahavi & Torbilo, 1996). Bu ömür değerlendirmeleri bir çok farklı yöntemle gerçekleştirilebilmektedir. Bununla beraber yorulma faktörleri de göz önüne alınmak suretiyle Wöhler diyagramlarından elde edilen ömür denklemleri ile gerçekleştirilen hesaplar basit ve gerçekçi sonuçlar ortaya koymuştur (Meral Bayraktar et al., 2014, 2010; Dikmen et al., 2012). Bu çalışmada da ömür analizleri benzer yaklaşımla gerçekleştirilmiştir. Denklemlerinde kullanılan diyagram Şekil 3'de gösterilmiştir. Diyagramda Log N belirli gerilme altında elde edilen gerilme çevrim sayısını logaritmik olarak ifade etmektedir. $1 \leq N \leq 10^3$ çevrim aralığı düşük çevrimli yorulma bölgesi (statik bölge) olarak adlandırılırken, $N \geq 10^3$ bölgesi süreli mukavemet bölgesini ifade eder. 10^6 veya 10^7 çevrim değeri demir esaslı malzemeler için sürekli mukavemet sınırını ifade eder (Shigley, 2011).



Şekil 3. Ömür hesaplarında kullanılan S-N diyagramı (Meral Bayraktar et al., 2014).

Şekil 3’deki diyagram vasıtası ile ömür değerleri Denklem (4)’ teki gibi elde edilebilir. Burada σ_u : Maksimum çekme dayanımı,

σ_e : sürekli mukavemet sınırı, σ_i : gerilme genliği ve Log Ni: bu gerilme genliğinde elde edilen logaritmik ömür değerini ifade etmektedir.

$$\log N = 3 + 3 \left[\frac{0,9.\sigma_u - \sigma_i}{0,9.\sigma_u - \sigma_e} \right] \quad (4)$$

Denklem (4), laboratuvar deney numunelerinin yorulma değerlendirmeleri için kullanılırken, bu çalışmada kullanılan kardan şaftı gibi gerçek makine parçalarında malzeme, (Km), boyut (Kb), yüzey (Ka) sıcaklık (Kd) yükleme faktörü (Kc), güvenilirlik faktörü (Kr) ve korozyonu da içeren diğer faktörler (Ke) gibi yorulma faktörlerinin de hesaplara dahil edilerek gerilme genlik değeri düzenlenirse;

$$\sigma'_i = \frac{K_f}{K_m.K_b.K_a.K_d.K_c.K_r.K_e} . \sigma_i \quad (5)$$

Denklemini elde edilir. Denklem (4) denklem (5) ile birleştirilirse

$$\log N = 3 + 3 \left[\frac{0,9.\sigma_u - \sigma'_i}{0,9.\sigma_u - \sigma_e} \right] \quad (6)$$

Denklemini edile edilir. Bu denklem makine parçalarının ömür değerlendirilmelerinde kullanılabilir. Çalışma kapsamında ömür analizi gerçekleştirilen kardan şaftının ömür denklemi Denklem (6) temel alınarak elde edilmiştir. Yukarıda belirtilen ömür faktörleri makine elemanları literatüründeki kaynaklardan (Akkurt, 2012; Shigley, 2011) elde edilmiştir. Ancak bu denklemler tekil dinamik gerilmeler altında yapılan hesaplamalar için geçerlidir. Araştırma konusu kardan şaftı gibi farklı dinamik yüklere farklı süreler altında maruz makine parçalarının mukavemet ve ömür hesaplarında birikimli hasar teorileri kullanılmaktadır (Fatemi & Yang, 1998). Farklı gerilme seviyelerinden dolayı yorulma hasarının birikimi problemi bu tür parçalarda ortaya çıkar (Lemaitre, 1996). İlk kümülatif hasar teorisi, A. Palmgren tarafından 1920’de İsveç’te rulmanların ömrünü tahmin etmek için uygulanmıştır (Meral Bayraktar et al., 2014). Palmgren-Miner doğrusal hasar kuralı, dinamik gerilim genliği döngülerinin toplanması sırasında bileşenin yorulma ömrünü tahmin eder. (Kauzlarich, 1989). Palmgren-Miner Kuralından sonra birçok hasar modeli geliştirilmesine rağmen, Palmgren-Miner, sunduğu basit çözümden dolayı bazı eksikliklerine rağmen tasarımda hala yaygın olarak kullanılmaktadır (Fatemi & Yang, 1998). K farklı gerilme aralıklarını, n_i σ_i gerilmesi altındaki geçirilen ömür. σ_i , N_i ömrüne karşılık gelen gerilmeyi, N_i ise sabit bir gerilme altında meydana gelebilecek ömür değerini çevrim olarak ifade etmek üzere Palmgren-Miner denklemi (7) ‘de belirtilmiştir. Denklemde. c_i orantı faktörüdür. ($c_i.N_{eq}=n_i$), N_{eq} eşdeğer ömür değeri σ_{eq} ise eşdeğer gerilme değeridir (Meral Bayraktar et al., 2014; SAATÇI & TAHRALI, 2003b, 2003a).

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_i}{N_i} = K \quad (7)$$

Denklemden K sabiti ($0,7 \leq K \leq 2,2$) aralığındadır $K \cong 1$ ne çelik parçalar için $K=1$ değeri yaklaşık olarak kullanılabilir. Bu durumda denklem aşağıdaki formu alır.

$$\sum_{i=1}^k \frac{c_i}{N_i} = \frac{c_1}{N_1} + \frac{c_2}{N_2} + \frac{c_3}{N_3} + \dots + \frac{c_i}{N_i} = \frac{1}{N_{eq}} \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^k \frac{c_i}{\sigma_i} = \frac{c_1}{\sigma_1} + \frac{c_2}{\sigma_2} + \frac{c_3}{\sigma_3} + \dots + \frac{c_i}{\sigma_i} = \frac{1}{\sigma_{eq}} \quad (9)$$

Palmgren-Miner denklemleri kullanılarak, farklı gerilme seviyelerinde çalışan makine parçalarının eşdeğer ömür veya eşdeğer gerilme saptamaları gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada da bu denklemlerden yararlanılmıştır.

Sonuç olarak çalışmada ömür verileri, vites kullanım oranları da göz önünde bulundurularak her vites için maksimum gerilmelerin, Denklem (9)'da yerine koyulmasıyla maksimum bileşke gerilmeler elde edilerek gerçekleştirilmiştir. Bileşke gerilme nihai olarak Denklem (6)'da yerine koyularak ömür değerleri çevrim olarak elde edilmiştir. Denklem (9)'deki; eşdeğer gerilme hesapları için vites kullanım oranları istatistiki olarak elde edilmiştir. İlgili katsayılar Tablo 8'de yer almaktadır.

Tablo 8. Vites Kullanım Oranlarına Göre c Katsayıları

Vites	Kullanım Yüzdesi (%)	c_i
1	1	0,01
2	5	0,05
3	10	0,1
4	18	0,18
5	26	0,26
6	40	0,4

Bu vasıta ile ömür hesapları büzmelili boru haricinde eşdeğer gerilmeye göre, büzmelili boruda ise tekil burulma gerilmesine göre her bir eleman için ayrı ayrı elde edilmiştir. Elde edilen bulgular izleyen bölümde yer almaktadır.

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışma kapsamında verilen ilgili denklemler kullanılarak gerçekleştirilen mukavemet analizi ile ömür analizi değerleri Tablo 9 ve 10'da görülmektedir.

Tablo 9. Mukavemet Analizi Sonuçları

Parça	Bileşke Gerilme (N/mm^2) (σ_{eq})	Emniyet Katsayısı (S)
Flanşlı Çatal	52,87	7,27
İstavroz	465,33	1,16
Tüp Çatal	52,467	7,57
Büzmelili Boru	128,496	2,24

Tablo 9'dan görülmektedir ki, mukavemet hesaplarında şaftın tüm elemanları maksimum bileşke gerilmeler altında 1 değerinin üzerinde emniyet katsayısına sahiptir. Hesaplamalar 1. Viteste en yüksek bileşke gerilme durumu altında gerçekleştirildiği için emniyet katsayısı nispeten düşük olarak tespit edilmekle birlikte vites çalışma yüzdelerine bakıldığında kardan şaftının ömrünün %1'lik kısmında bu gerilme altında çalışmasından dolayı 1'den büyük emniyet katsayısı kabul edilebilir düzeydedir. Bununla beraber emniyet katsayısı ve güvenilirlik, malzeme veya geometri değişimi ya da ısıl işlem yoluyla artırılabilir.

Salt mukavemet hesapları dinamik gerilmeler altında zorlanan ve yorulma temelli hasara uğrayan makine parçaları için yeterli hesaplar değildir (Tahralı et al., 2017). Bu çalışmada ek olarak bileşke gerilmeler altındaki ömür değerlerinin hesaplamaları, vites kullanım yüzdeleri dikkate alınarak hesaplanmıştır ve sonuçlar Tablo 10'da görülmektedir.

Tablo 10. Ömür Analizi Sonuçları

Parça	Bileşke Ömür (çevrim) (N_{eq})
Flanşlı Çatal	1,06.10 ¹⁹
İstavroz	6,01.10 ¹³
Tüp Çatal	2,25.10 ²⁰
Büzmeli Boru	3,73.10 ¹³

Mukavemet ve ömür analizi sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, emniyet katsayısı yüksek olduğu görülen flanşlı çatal ve tüp çatalın, seçilen elemanların içerisinde üreticinin saha verilerinde en az hasar meydana gelen elemanlar olduğu teyit edilmiştir. Üretici, servis ömrü olarak katalog bilgisinde kardan şaftına ortalama 800000 km (10^{9,23} çevrim) garanti vermektedir. Bu çalışma kapsamında ömür analizlerinde en zayıf olarak tespit edilen elemanlar olan istavroz ve büzmeli boru kısımlarında dahi bu değerler çok üzerinde ömür değerleri tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda, normal çalışma şartlarında katalog ömrü olarak verilen değerlerin ilgili kritik parçalar temelinde sağlandığı belirlenmiştir. Aynı şekilde üreticinin verilerine göre istavroz kısmında kullanım esnasında hasarlar meydana geldiği görülmüştür ve bu kısımda elde edilen düşük emniyet katsayısı hesabı, kullanım alanında öngörülemez yüksek bir moment veya bir dış etki olması durumunda elemanda hasar görülebileceğini göstermektedir. Bu da istavrozda yapılacak bir iyileştirmenin olumlu etki oluşturabileceğini göstermiştir. Boru kısmında ise saha verileri yorulma hasar bulgusunu göstermezken, üretilen şaftların test edildiği laboratuvar ölçekli statik burulma deneylerinde bazı numunelerde boru kısmında hasar meydana geldiği görülmüştür. Bu da yine tespit edilen emniyet katsayısı değerlerinin ekstra yüklemeler için artırılabilir yorumuna ulaştırmıştır. Literatürde yapılan benzer çalışmalar irdelendiğinde, çalışmaların bir kısmında kardan şaftının yalnız boru kısmıyla ilgili ömür ve mukavemet analizlerinin gerçekleştirildiği görülmektedir (Abu Talib, Ali, Badie, Azida Che Lah, & Golestaneh, 2010; Elanchezian et al., 2018; Sener, 2016). Ancak gerçekleştirilen bu çalışmayla beraber sadece boru kısmı hesaplarının yeterli olmadığı görülmüştür. Öbür taraftan kardan şaftının saha hasar verileri ve literatürdeki bazı çalışmalar incelendiğinde şaftın hasara uğrayan istavroz, istavroz rulmanı ve çatal gibi kritik başka kısımlarının da olduğu görülmektedir (Bayrakceken et al., 2007; Palma et al., 2017; Vesali et al., 2012). Sistemin kinematik özelliğinden dolayı moment iletimi esnasında sistem eğişken zorlanmalara maruz kalmaktadır. Bu sebeple istavrozun yuvarlanmalı yatak bileziğinde ve muylu kısmında yüzey yorulma hasarları oluşabilmektedir. Buradaki yatakların tıpkı diğer makine elemanlarında kullanılan yataklarda olduğu gibi belirli ömür değerleri bulunmaktadır (Uçar, 1999). Literatürdeki başka bir çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ile kardan şaftı üzerindeki kritik gerilme noktalarının tespit edilerek ve yüzey pürüzlülüğü, sertlik gibi etkilerin de dahil edilerek elde edilen gerilmelerin küçük ölçekli laboratuvar test numunesi vasıtasıyla geleneksel yorulma test makinesinde simüle edilmesi sonucunda Wöhler eğrisi tabanlı yaklaşımın oluşturulması üzerine yapılan çalışmadır (Palma et al., 2017). İlgili çalışmada yorulma analizlerinde Wöhler tabanlı yaklaşım kullanılabilirliği gösterilmiştir ancak şaftın tümünün gerçek ortamda yorulma analizi verileri ya da gerçek saha verileri kullanılmamıştır. Bir diğer çalışmada prototip olarak üretilen yeni ve özgün tasarımlı çelik saç bir kardan mafsallının yorulma analizleri eğilme açılarının değiştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir (Tanik et al., 2015). Yine literatürde sahada hasara uğramış kardan şaftlarının hasar mekanizmalarının incelendiği çalışmalar bulunmaktadır (Pantazopoulos, Sampani, & Tsagaridis, 2007).

Bu makale kapsamında gerçekleştirilen çalışmada ise sonlu elemanlar analizi yerine deneysel verilerle de doğrulanan analitik hesaplar sabit açı kabulü ile gerçekleştirilmiş ve bu analitik hesaplar literatürdeki bahsedilen çalışmalarda olduğu gibi gerçek saha verileri ile kıyaslanmıştır. Saha verileri, ticari gizlilik dolayısıyla bu makalede tam olarak yansıtılamamakla birlikte, sahadaki hasar yüzdeleri, analitik hesabı gerçekleştirilen elemanların hesap sonucu elde edilen kritiklik sıralaması ile uymaktadır. Ayrıca ömür analizinde maksimum gerilmeler yerine eşdeğer gerilme kullanılması doğru yorulma ömür değerlerinin elde edilmesini sağlamıştır. Sonuçlar ele alındığında, korozif olmayan atmosfer şartlarındaki normal kullanım verileri, elde edilen ömür çevrim değerlerinin tasarım için fazlasıyla uygun olduğunu, meydana gelen hasarların ancak ekstra yüklemeler veya darbeler vasıtasıyla oluşabileceğini göstermiştir. Saha verileri ve firmanın laboratuvarında gerçekleştirdiği yorulma testlerinde, istavroz ve istavroz rulmanı, kardan şaftının hasara uğrayan en temel kısımlarıdır. İstavroz rulmanı tedarikçiden hazır alındığı, elemanın ömür analizleri dinamik deneylerle gerçekleştirdiği ve tasarım iyileştirmesi mümkün olmadığı için bu çalışma kapsamında analiz edilmemiştir. Ayrıca çalışmada hem emniyet katsayısı hem ömür değerlerinde tüp çatal ve çatalı flanş adı verilen elemanların gereğinden çok yüksek değerlere sahip olduğu görülmüştür. Bir elemanda hasarın en zayıf unsurda meydana geleceği bilindiği için bu elemanlardaki yüksek emniyet katsayılarının diğer elemanlarda oluşabilecek hasarlara herhangi bir etkisi yoktur. Dolayısıyla bu elemanlar için tasarım koşulları hem maliyeti hem ataletleri azaltacak şekilde iyileştirilebilir.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, tasarım hesaplarında gerçekleştirilecek mukavemet ve ömür analizleri ile laboratuvar testleri ve saha hasar verilerine yakın değerlerin elde edilebileceği görülmüştür. Bu vesile hem büyük riskler taşıyan kardan şaftı hasarlarının önüne geçilebileceği hem de kardan şaftını tahribata uğratan, uzun süreler alan ve maddi kayıplara yol açan yorulma test sayılarının azaltılabileceği görülmüştür. Ayrıca yapılan hesaplamalar ile kardan şaftı tasarımlarında malzeme ve dolayısıyla ağırlık kazancı sağlanabileceği, bunun yanı sıra üretim prosesini kolaylaştıracak geometrik değişikliklere gidilebileceği görülmüştür. Ayrıca kritik elemanların tespitiyle bu elemanlara uygulanacak malzeme iyileştirmeleri, ısı işlemler veya geometrik iyileştirmeler vasıtasıyla üretim maliyetleri azaltılabilir ya da mukavemet ve ömür iyileştirmelerine gidilebilir. Sonuç olarak laboratuvar testleri ve saha geri bildirimleri birlikte değerlendirildiğinde tasarımların iyileştirilmesi hususunda ömür ve mukavemet analizlerinin çok büyük öneme sahip olabileceği görülmüştür. Çalışmada incelenen kritik parçalarda katalog ömürlerinden çok daha yüksek ömürlerin yüksek güvenilirlikte elde edildiği görülmüştür. Öneri olarak bu çalışmayı takip eden çalışmalarda, kardan şaftının tüm elemanlarının yorulma analizleri detaylı olarak gerçekleştirilebilir. Böylece her bir parça, yakın ömür değerlerinde tasarlanarak, uygulanacak stratejiye göre üretim maliyeti düşüşü veya güvenilirlikli tasarım eldesi mümkün olabilir.

Referanslar

- Abu Talib, A. R., Ali, A., Badie, M. A., Azida Che Lah, N., & Golestaneh, A. F. (2010). Developing a hybrid, carbon/glass fiber reinforced, epoxy composite automotive drive shaft. *Materials and Design*, 31(1), 514–521. doi:10.1016/j.matdes.2009.06.015
- Akkurt, M. (2012). *Makine Elemanları Teorik Esasları ve Hesap Yöntemleri Cilt 1-4*. İstanbul: Seçkin Yayınevi.
- Badie, M. A., Mahdi, E., & Hamouda, A. M. S. (2011). An investigation into hybrid carbon/glass fiber reinforced epoxy composite automotive drive shaft. *Materials and Design*, 32(3), 1485–1500. doi:10.1016/j.matdes.2010.08.042
- Bayrakceken, H., Tasgetiren, S., & Yavuz, I. (2007). Two cases of failure in the power transmission system on vehicles: A universal joint yoke and a drive shaft. *Engineering Failure Analysis*, 14(4), 716–724. doi:10.1016/j.engfailanal.2006.03.003
- Bayraktar, M., & Tahralı, N. (2009). Design of rail vehicle axles related to failure and life. *5th International Advanced Technologies Symposium*, (May).
- Bayraktar, Meral, Guclu, R., & Tahralı, N. (2014). A New Approach for Reliability Life Prediction of Rail Vehicle Axle by Considering Vibration Measurement. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 1–12. doi:10.1155/2014/506403
- Bayraktar, Meral, Tahralı, N., & Guclu, R. (2010). Reliability and fatigue life evaluation of railway axles. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24(3), 671–679. doi:10.1007/s12206-009-1219-1
- Dikmen, F., Bayraktar, M., & Guclu, R. (2012). Railway axle analyses: Fatigue damage and life analysis of rail vehicle axle. *Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 58(9), 545–552. doi:10.5545/sv-jme.2011.206
- Elanchezhian, C., Vijaya Ramnath, B., Sripada Raghavendra, K. N., Muralidharan, M., & Rekha, G. (2018). Design and Comparison of the Strength and Efficiency of Drive Shaft made of Steel and Composite Materials. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 1000–1007. doi:10.1016/j.matpr.2017.11.176
- Fatemi, A., & Yang, L. (1998). Cumulative fatigue damage and life prediction theories: A survey of the state of the art for homogeneous materials. *International Journal of Fatigue*, 20(1), 9–34. doi:10.1016/S0142-1123(97)00081-9
- Göksenli, A., & Eryürek, I. B. (2009). Failure analysis of an elevator drive shaft. *Engineering Failure Analysis*, 16(4), 1011–1019. doi:10.1016/j.engfailanal.2008.05.014
- Guo, H., Mao, K., Liu, Y., & Liang, G. (2019). Experimental study on fatigue performance of Q460 and Q690 steel bolted connections. *Thin-Walled Structures*, 138(5), 243–251. doi:10.1016/j.tws.2019.02.011
- Henry, T. C., Bakis, C. E., & Smith, E. C. (2015). Viscoelastic characterization and self-heating behavior of laminated fiber composite driveshafts. *Materials and Design*, 66(PA), 346–355. doi:10.1016/j.matdes.2014.10.083
- Hu, Y., Zhang, B., & Tan, A. C. (2020). Acceleration signal with DTCWPT and novel optimize SNR index for diagnosis of misaligned cardan shaft in high-speed train. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 140(111), 106723. doi:10.1016/j.ymsp.2020.106723
- Hummel, S. R., & Chassapis, C. (2000). Configuration design and optimization of universal joints with manufacturing tolerances. *Mechanism and Machine Theory*, 35(3), 463–476. doi:10.1016/S0094-114X(98)00092-5
- Kauzlarich, J. J. (1989). The Palmgren-Miner rule derived. *Tribology Series*, 14(C), 175–179. doi:10.1016/S0167-8922(08)70192-5

- Khurmi, R. ., & Gupta, J. K. (2005). *A textbook of machine design*. New Delhi: Eurasia Publishing House (PVT.) LTD.
- Kishore, M., Keerthi, J., & kumar, V. (2016). Design and Analysis of Drive Shaft of an Automobile. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 38(6), 291–296. doi:10.14445/22315381/ijett-v38p253
- Köhler, M., Jenne, S., Pötter, K., & Zenner, H. (2017). *Load Assumption for Fatigue Design of Structures and Components*. Springer. doi:10.1007/978-3-642-55248-9
- Lemaitre, J. (1996). *A Course on Damage Mechanics*. Springer.
- Marczewska, I., Bednarek, T., Marczewski, A., Sosnowski, W., Jakubczak, H., & Rojek, J. (2006). Practical fatigue analysis of hydraulic cylinders and some design recommendations. *International Journal of Fatigue*, 28(12), 1739–1751. doi:10.1016/j.ijfatigue.2006.01.003
- Nadeem, S. K. S., Giridhara, G., & Rangavittal, H. K. (2018). A Review on the design and analysis of composite drive shaft. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 2738–2741. doi:10.1016/j.matpr.2018.01.058
- Niemann, G., W., & H., Höhn, B.-R. (1975). *Mashinenelemente Band 1*. Springer-Verlag.
- Palma, P., Tiussi, G., Donadon, A., Raffaglio, Y., Luca, A. De, Leitner, M., Benasciutti, D. (2017). Fatigue Assessment of Universal Cardan Joint Based on Laboratory Specimen Tests, (July), 396–408. doi:10.5151/1983-4764-26870
- Pantazopoulos, G., Sampani, A., & Tsagaridis, E. (2007). Torsional failure of a knuckle joint of a universal steel coupling system during operation - A case study. *Engineering Failure Analysis*, 14(1), 73–84. doi:10.1016/j.engfailanal.2005.12.005
- SAATÇI, G. E., & TAHRALI, N. (2003a). Birikimli hasar teorileri ve hareket iletim elemanına uygulanması. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 1(2), 21–30.
- SAATÇI, G. E., & TAHRALI, N. (2003b). Birikimli Hasar Teorileri ve Yorulma Catlagina Gore Omur Degerlendirmeleri. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 1(2), 33–39. Retrieved from <http://www.hho.edu.tr/hutendergi/2003Temmuz/07.pdf>
- Santecchia, E., Hamouda, A. M. S., Musharavati, F., Zalnezhad, E., Cabibbo, M., El Mehtedi, M., & Spigarelli, S. (2016). A Review on Fatigue Life Prediction Methods for Metals. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 1–26. doi:10.1155/2016/9573524
- Sener, A. S. (2016). Driving Shaft Fatigue Life Determination According to Turkish Mission Profiles. *International Journal of Engineering Technologies, IJET*, 2(1), 14. doi:10.19072/ijet.13966
- Shigley, J. E. (2011). *Shigley's mechanical engineering design Ninth Edition*. McGraw-Hill. Tata McGraw-Hill Education.
- Sines, G., & Ohgi, G. (2016). Fatigue Criteria Under Combined Stresses or Strains, 103(April 1981).
- Tahralı, N., Atik, E., & Çivi, C. (2017). *Konstrüksiyon Elemanlarında Güvenirlik (Reliability) ve Ömür Hesapları*. Ankara: Seçkin Yayınevi.
- Tanik, Ç. M., Parlaktaş, V., Tanik, E., & Kadioğlu, S. (2015). Steel compliant Cardan universal joint. *Mechanism and Machine Theory*, 92, 171–183. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2015.05.009
- Toasa Caiza, P. D., & Ummenhofer, T. (2018). A probabilistic Stüssi function for modelling the S-N curves and its application on specimens made of steel S355J2+N. *International Journal of Fatigue*, 117(July), 121–134. doi:10.1016/j.ijfatigue.2018.07.041
- Uçar, M. (1999). Kardan Kaplinlerinde Hasara Etki Eden Faktörler Ve Alınması Gereken Tedbirler. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(2), 1033–1039.
- Vesali, F., Rezvani, M. A., & Kashfi, M. (2012). Dynamics of universal joints, its failures and some propositions for practically improving its performance and life expectancy. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(8), 2439–2449. doi:10.1007/s12206-012-0622-1
- Zahavi, E., & Torbilo, V. (1996). *Fatigue design: life expectancy of machine parts*. CRC Press.



Betonarme Kirişlerin Sarılma Bölgesi Uzunluğunun Araştırılması Üzerine Bir Çalışma

A Study on Investigation of Length of Hugging Zone of Reinforced Concrete Beams

Sinan Cansız¹

¹*Istanbul Aydın Üniversitesi, 34083-İstanbul, TÜRKİYE*

Başvuru/Received: 13/05/2020

Kabul / Accepted: 18/01/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 04/02/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Bu çalışmada, farklı kesme açıklığı ile farklı sarılma bölgesi uzunluğuna sahip kirişlerin sismik analizi bilgisayar programı yardımı ile yapılmıştır. Çalışma kapsamında betonarme kirişlerin sarılma bölgesinin uzunluğunun kiriş davranışına etkisi incelenmiştir. Betonarme kirişlerin sarılma bölgesi ile kesme açıklığı uzunluğunun ilişkisi analitik olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda farklı kesme açıklığına sahip 9 betonarme kiriş bilgisayar programında analitik olarak modellenerek, yük-yer değiştirme ilişkileri incelenmiştir. Özellikle kesme açıklığının etkili derinliğe oranı 6'dan büyük kirişlerde sarılma bölgesi uzunluğunun artırılması deprem güvenliği açısından önemli olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan analitik modelin doğrulanması amacıyla literatürde yapılmış deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak analitik modelin deneysel veriye çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

"Betonarme Kiriş, Sismik Analiz, Sarılma Bölgesi"

Abstract

In this study, the seismic analysis of beams with different shear span and different hugging lengths has done with the help of a computer program. Within the scope of the study, the effect of the length of the hugging zone of reinforced concrete beams on the beam behavior was investigated. The relationship between the length of the hugging zone of the reinforced concrete beams and the length of the shear span has determined analytically. In this context, 9 reinforced concrete beam with different shear spans have analyzed analytically and load-displacement relations have been examined by the computer program. It has been determined that increasing the length of the hugging zone is important for earthquake safety, especially for beams with a value of 6 to the depth of the shear spanning to the effective depth. In addition, in order to confirm the analytical model used in the study, it has been compared with the experimental data made in the literature. As a result, it has seen that the analytical model gave very close results to the experimental data.

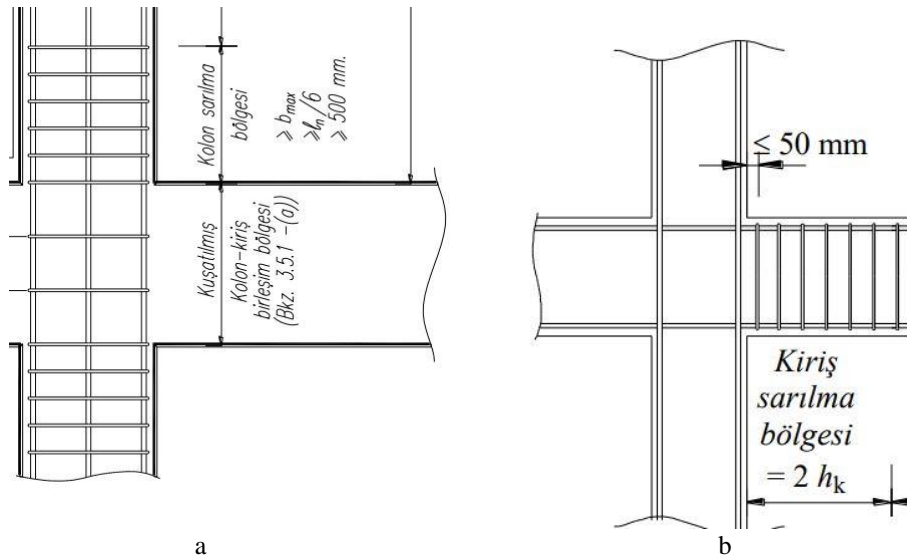
Key Words

"Reinforced Beams, Seismic Analysis, Hugging Zone"

1. Giriş

Betonarme yapıların tasarımında kullanılan birçok ulusal ve uluslararası deprem yönetmeliklerinde şekil değiştirme esaslı yaklaşımlara yer vermektedir. Dünyada 1990'lı yıllarda gerçekleşen depremlerden sonra dayanıma göre tasarım prensibi ile tasarlanan binaların deprem sonrası ağır hasar alması veya tekrar kullanılamaması sebebiyle ekonomik kayıplara sebep olmuştur. Vision 2000 belgesi ile Kalifornia Mühendisler Birliğini tarafından performansa dayalı tasarım yaklaşımı benimsenerek şekil değiştirme esaslı yaklaşımların temelleri atılmıştır. Sonrasında birçok araştırmacı tarafından yapılan deneysel ve analitik çalışmalar sonucu birçok yönetmelik performansa dayalı tasarım prensibini benimsemeye başlamıştır (ACI 318 (2011), EUROCODE-8 (2003), FEMA356 (2000), TS-500 (2000), Ersou U (1998), Foroughi vd. (2019) ve Aykaç vd. (2011)).

Betonarme yapıların tasarımında kullanılan yaygın yönetmeliklerde sünek tasarım ilkeleri doğrultusunda yaklaşımlar kullanılmaktadır. Deprem kuvvetlerinin yapıya etkimesi sebebiyle oluşacak hasarları sınırlandırmak ve güçlü kolon-zayıf kiriş prensibini sağlama amacıyla sismik yönetmeliklerde birçok önlem alınmaktadır. Bu önlemler; kolonların eksenel yük seviyesini sınırlandırma ($N_d < 0.4A_c f_c$), güçlü kolon-zayıf kiriş prensibini sağlama, kolon-kiriş birleşim bölgelerini sık etriye ile sarma ve kolon-kirişlerin plastik mafsallık bölgesini sık etriye ile sarılması olarak sıralanabilir. Deprem anında oluşan yüksek kesme kuvveti karşılama amacıyla özellikle sarılma bölgelerinde sık etriye kullanılması yapıların kesme güvenliği açısından önem arz etmektedir. Bu amaçla yönetmelikler incelendiğinde; Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY-2007) kolonların ve kirişlerin sarılma bölgelerinin uzunluğunu sınırlandırmıştır.

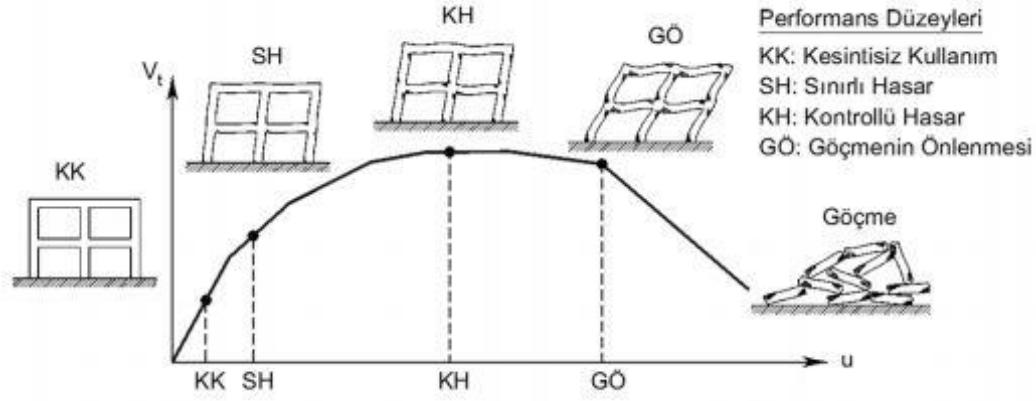


Şekil 1: (a) Kolon sarılma bölgesi tanımı; (b) Kiriş sarılma bölgesi tanımı (DBYBHY-2007)

Benzer şekilde 2018 yılında yayımlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği de (TBDY-2018) kolon-kiriş sarılma bölgelerinin uzunluğunu DBYBHY (2007) gibi kabul etmiştir. Sadece kolonların sarılma bölgesinin minimum uzunluğu $1.5 b_{max}$ değerine çıkarılmıştır. Burada b_{max} kolonun enkesitine ait boyutlarının maksimum olanını ifade etmektedir.

Betonarme kirişlerin kesme açıklığının etkili derinliğe oranındaki (a/d) değişim davranışı önemli oranda değiştirmektedir. Bu orandaki değişim doğrultusunda kiriş-kemer karma davranışı gösterebilmektedir. Betonarme kirişte enine donatı bulunmasa dahi kesme dayanımı betonun katkısı ve kemer davranışa yatkınlık sebebiyle beklenen düzeyden yüksek çıkabilmektedir. Kirişte enine donatı bulunması durumunda, depremden veya düşey yüklerden kaynaklı kesme etkisinin oluşturacağı asal çekme gerilmelerini karşılayarak, kiriş içinde olduğu kabul edilen gerginli kemerin genel kiriş davranışına etkisini değiştirmektedir. Betonarme kirişlerin kesme açıklığının etkili derinliğe oranının (a/d) yapısal davranışa etkisi üzerine çalışan Mörsch'ün kafes kiriş kuramına göre betonarme kirişlerin genel olarak hayali bir iç kafes temelinde çalıştığı kabul edilmektedir (Mörsch (1902)). a/d oranı 7'den büyük kirişlerde eğilme davranışı olduğu ve kesme etkilerinin zayıf kaldığı bilinmektedir. a/d oranı daha düşük kirişlerde ise kesme etkileri dikkate alınması gereken bir parametre olduğu önceki çalışmalarda görülmüştür.

Bu çalışma kapsamında, kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranındaki değişkenlik ile kiriş sarılma bölgesinin uzunluğunun ilişkisi araştırılacaktır. TBDY-2018'de kiriş sarılma bölgelerinin uzunluğu kiriş yüksekliğinin 2 katı ($2h_k$) olarak tanımlanmış olup, bu değer a/d oranının etkisini dikkate alan bir yaklaşımla belirlenmesi gerektiği düşünülmektedir. Bu amaçla, kesme açıklığının etkili derinliğe oranı (a/d) ile kiriş sarılma bölge uzunluğu değişken olan 9 adet betonarme kiriş tasarlanarak analitik çözümü yapılmıştır. Seçilen kirişlerin a/d oranlarının kesme etkisini yansıttığını amacıyla 8 ve 8 den küçük değerler seçilmiştir. Betonarme kirişlerin analitik çözümünde Seismo-Struct 2020 programı kullanılmıştır. Ayrıca analitik modelin doğruluğunu göstermek için literatürde deneyi yapılmış kirişlerin deneysel sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sırasında TBDY-2018'de tanımlanan performans düzeyleri kullanılmıştır. TBDY-2018'de verilen performans düzeyleri Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2: TBDY-2018'e göre betonarme elemanların performans düzeyleri

TBDY-2018'e göre tanımlanan performans düzeyleri, malzeme şekil değiştirme değerleri cinsinden hesaplanmaktadır. Bu hesaplar 1-5 bağıntılarında gösterilmektedir.

$$\varepsilon_c^{(GÖ)} = 0.0035 + 0.07\sqrt{\omega_{wc}} \leq 0.01 \quad (1)$$

$$\varepsilon_s^{(GÖ)} = 0.4\varepsilon_{su} \quad (2)$$

$$\theta_p^{(GÖ)} = \frac{2}{3} \left[(\phi_u - \phi_y) L_p \left(1 - 0.5 \frac{L_p}{L_s} \right) + 4.5 \phi_u d_b \right] \quad (3)$$

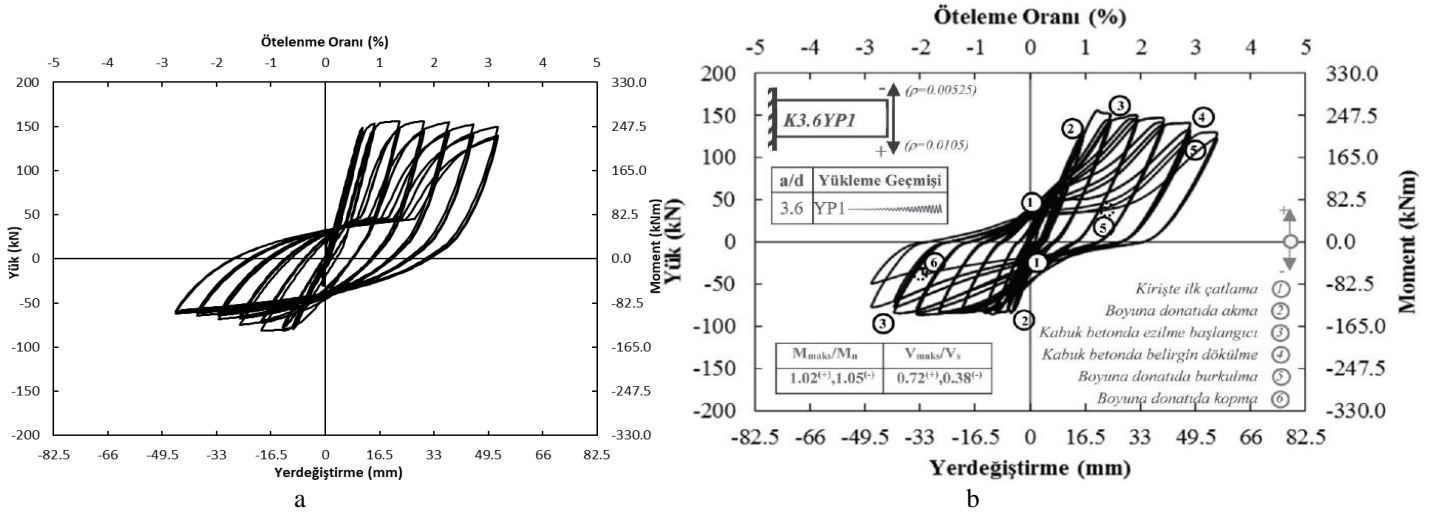
$$\theta_p^{(KH)} = 0.75 \theta_p^{(GÖ)} \quad (4)$$

$$\theta_p^{(SH)} = 0 \quad (5)$$

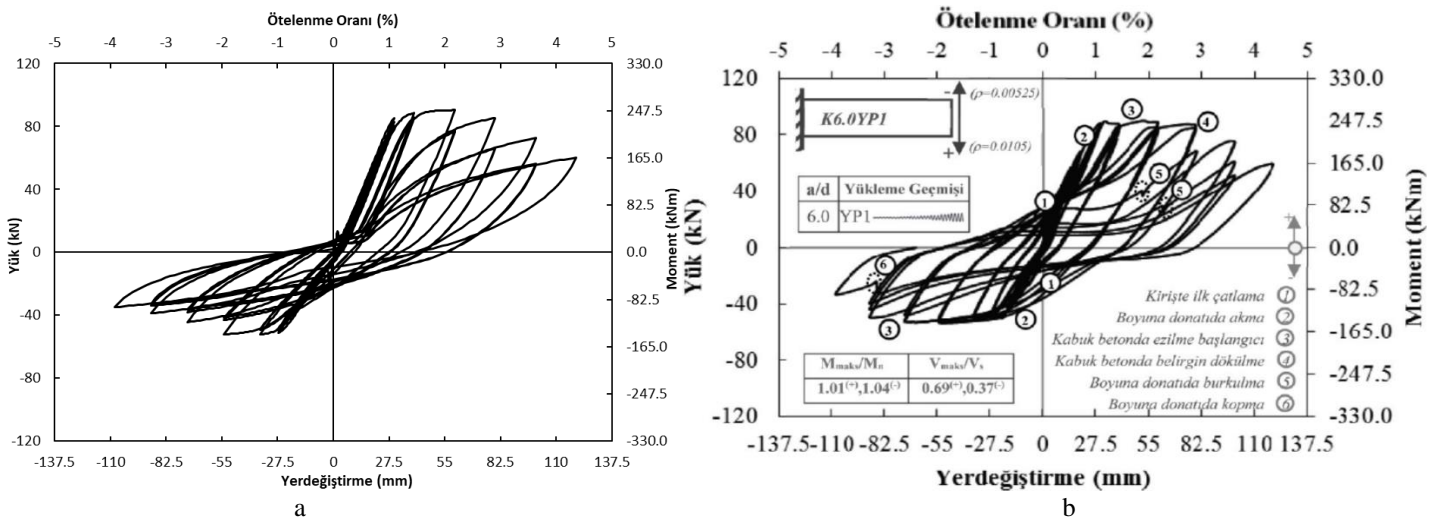
Burada; ε_c en dış beton basınç lifindeki kısılmayı, ω_{wc} yanal donatı mekanik indeksi, ε_s boyuna donatıya ait birim uzama, ε_{su} boyuna donatıya ait maksimum gerilme anındaki birim uzama, θ_p elemana ait plastik dönme oranını, ϕ_u kesite ait maksimum eğriliği, ϕ_y kesite ait akma eğriliğini, L_p plastik mafsal boyunu, L_s kesme açıklığını ve d_b boyuna donatı çapını ifade etmektedir.

2. Analitik Modeller ve Doğrulama Modeli

Betonarme kirişlerin analitik sonuçlarının araştırılması amacıyla Seismo-Struct 2020 programı kullanılmıştır. Programda kullanılan malzeme modelleri TBDY-2018'de kabul edilen malzeme modelleridir. Ayrıca programın uygun sonuç verdiğini kontrol etme amacıyla literatürde kullanılan deneylerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, literatürde deneyi yapılmış 2 kiriş numunesi Seismo-Struct 2020 programında modellenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3-4'de karşılaştırılmaktadır.



Şekil 3: (a) Seismo-Struct modeline ait sonuç; (b) K3.6YP1 numunesinde çevrimsel yük-yerdeğiştirme ilişkisi (Aydemir vd. 2020)



Şekil 4: (a) Seismo-Struct modeline ait sonuç; (b) K6.0YP1 numunesinde çevrimsel yük-yerdeğiştirme ilişkisi (Aydemir vd. 2020)

Deneysel verilere en yakın sonuçları veren malzeme modelleri parametreleri doğru seçildiğinde oldukça yakın sonuçlar verebilmektedir. Bu doğrultuda, programın deneysel sonuçları çok yakın tahmin ettiği düşünülmektedir. Ayrıca aynı model üzerinden sıklaştırma bölgesinin uzunluğu ile kesme açıklığı değiştirilerek daha homojen sonuçlar alınması planlanmıştır.

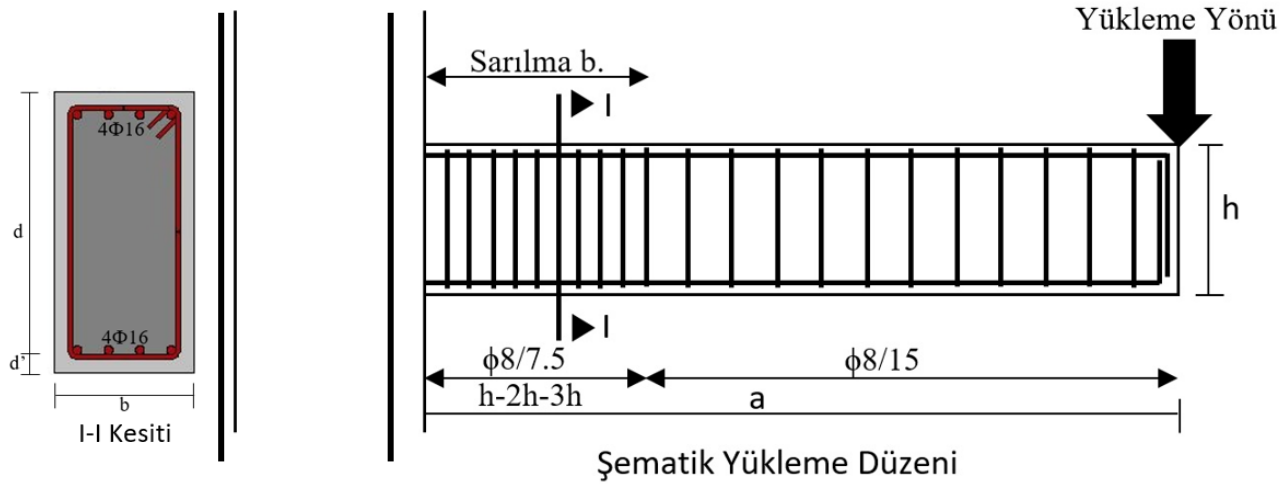
2.1. Kirişlerin Özellikleri

Çalışma kapsamında iki parametre değişken kabul edilmiştir. Bu doğrultuda, kesme açıklığının etkili derinliğe oranının 4-8 aralığındaki değerler incelenmiştir. Bilindiği gibi a/d oranı 2.5 altında olan kirişlerde kesme davranışı eğilme davranışına göre daha baskın olmaktadır. Bu çalışmada, eğilme kırılmasına maruz kalmış ve eğilme etkin davranışına sahip modellerin kiriş sarılma bölgesinden nasıl etkilendiği araştırılmıştır. Kirişlerde sarılma bölgesinin uzunluğu TBDY-2018'de kesit yüksekliğinin 2 katı olarak sabit kabul edilmiştir. Bu çalışmada, sarılma bölgesi uzunluğunun kesme açıklığı yüksek olan kirişlerde davranışa etkisini görebilmek amacıyla üç farklı sarılma bölgesi uzunluğu kullanılmıştır. Bu amaçla, üretilen modellerin özellikleri Tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1: Kirişlere ait özellikler

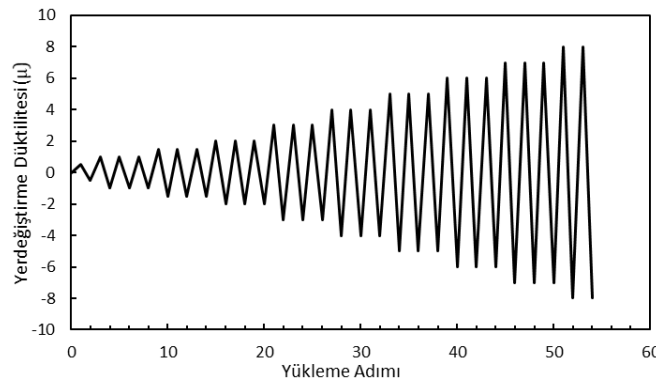
Kiriş Adı	Malzeme	a/d	b (mm)	h (mm)	d' (mm)	d (mm)	a (mm)	ϕ_s (mm)	Üst Donatı	Alt Donatı	Etriye Düzeni	$L_{\text{sarılma}}$ (mm)					
K-4-S1H	C30/S420	4	250	500	25	475	1900	8	4 ϕ 16	4 ϕ 16	ϕ 8/75/150	500					
K-4-S2H	C30/S420	4	250	500	25	475	1900	8	4 ϕ 16	4 ϕ 16	ϕ 8/75/150	1000					
K-4-S3H	C30/S420	4	250	500	25	475	1900	8	4 ϕ 16	4 ϕ 16	ϕ 8/75/150	1500					
K-6-S1H	C30/S420	6	250	500	25	475	2850	8	4 ϕ 16	4 ϕ 16	ϕ 8/75/150	500					
K-6-S2H	C30/S420	6	250	500	25	475	2850	8	4 ϕ 16	4 ϕ 16	ϕ 8/75/150	1000					
K-6-S3H	C30/S420	6	250	500	25	475	2850	8	4 ϕ 16	4 ϕ 16	ϕ 8/75/150	1500					
K-8-S1H	C30/S420	8	250	500	25	475	3800	8	4 ϕ 16	4 ϕ 16	ϕ 8/75/150	500					
K-8-S2H	C30/S420	8	250	500 </tr <tr> <td>K-8-S3H</td> <td>C30/S420</td> <td>8</td> <td>250</td> <td>500</td> <td>25</td> <td>475</td> <td>3800</td> <td>8</td> <td>4ϕ16</td> <td>4ϕ16</td> <td>ϕ8/75/150</td> <td>1500</td> </tr>	K-8-S3H	C30/S420	8	250	500	25	475	3800	8	4 ϕ 16	4 ϕ 16	ϕ 8/75/150	1500
K-8-S3H	C30/S420	8	250	500	25	475	3800	8	4 ϕ 16	4 ϕ 16	ϕ 8/75/150	1500					

Burada; b kiriş genişliğini, h kiriş yüksekliğini, d' paspayını, d etkili derinliği, a kesme açıklığını, ϕ_s enine donatı çapını ve $L_{\text{sarılma}}$ sarılma bölgesi uzunluğunu göstermektedir. Bu çalışma kapsamında üretilen modellerde benzer donatı düzeni modellenmiştir. Boyuna donatılar için alt ve üst mesnet donatıları 4 ϕ 16 olarak seçilmiştir. Enine donatılar için ise sarılma bölgelerinde 75 mm etriye aralığı seçilmiş olup, kiriş açıklıklarında 150 mm etriye aralığı kullanılmıştır. Tüm enine donatıların çapı 8 mm olarak seçilmiştir. Çalışma kapsamında, TBDY-2018'de tanımlanan kiriş sarılma bölge uzunluğu olan 2h değerinin yarısı ve 2 katı olan 1h-3h değerleri de dikkate alınarak modeller oluşturulmuştur. Seismo-Struct 2020 programında modellenen kirişlerin şematik yükleme düzeni ile en kesiti Şekil 5'de gösterilmektedir.

**Şekil 5:** Şematik yükleme düzeni ve kesit

2.2. Yükleme Profili

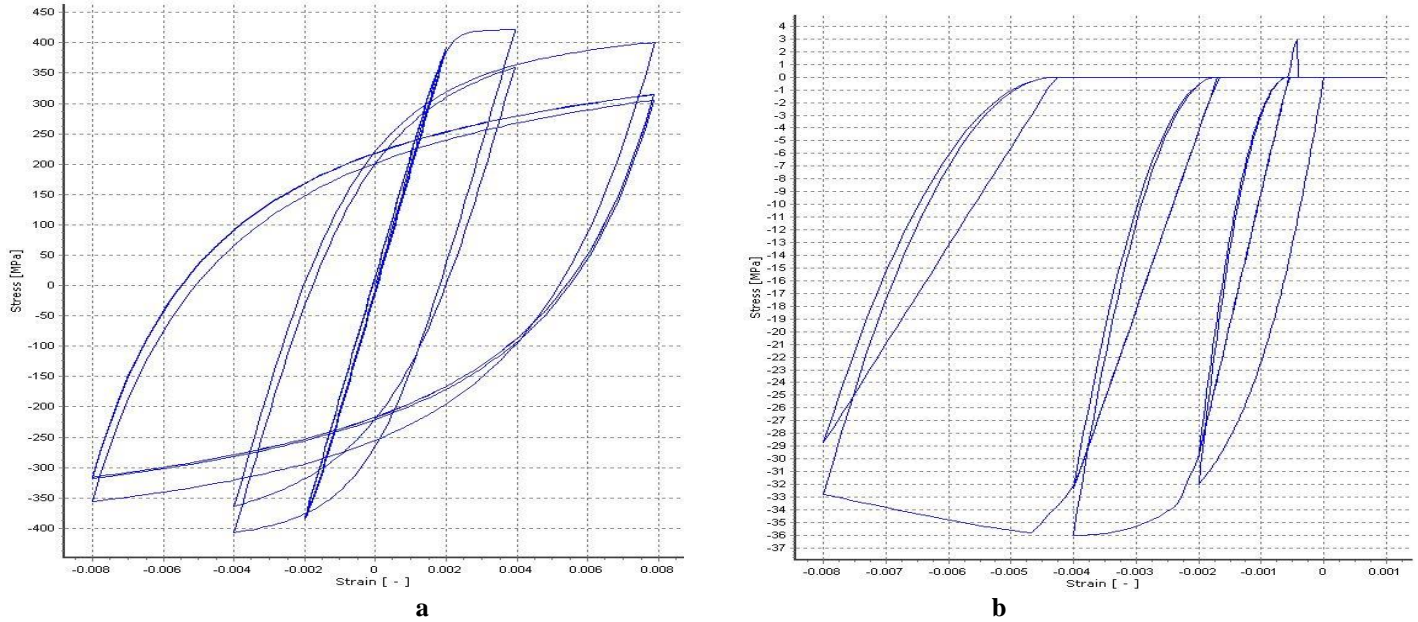
Çalışma kapsamında incelenen tüm kirişlerde benzer yükleme profili kullanılmıştır. Literatürde sıklıkla araştırmacılar tarafından kullanılan artan genlikli çevrimsel yükleme kiriş ucundan uygulanmıştır (Lehmann ve Moehle). Bu kapsamda analitik olarak tanımlanmış yükleme profili Şekil 6'da gösterilmektedir.

**Şekil 6:** Şematik yükleme profili

Çalışmada kullanılan yükleme profili hesaplanırken, monotonik yükleme altında tespit edilmiş akma yer değiştirmesinin katları olarak uygulanmıştır. Akma öncesinde akma yer değiştirmesinin yarısı kadar uygulanan yer değiştirme değeri tek tekrarlı olarak uygulanmıştır. Akma yer değiştirmesi değeriyle birlikte üç tekrarlı ve artan düktilite katları ($1\mu-1.5\mu-2\mu-3\mu-4\mu\dots$) olarak tanımlanmıştır.

2.3. Seismo-Struct Programında Modelleme

Betonarme kirişin davranışını etkileyen önemli parametrelerden biriside malzeme modellerinin seçimi olmaktadır. Bu doğrultuda donatının davranışını tanımlama amacıyla Managetto-Pinto modeli kullanılmıştır. Betonun davranışını için ise Mander vd. tarafından tanımlanan doğrusal olmayan davranış temsil eden model kullanılmıştır. Programda tanımlanan modellerin ekran alıntıları Şekil 7’de gösterilmektedir.



Şekil 7: (a) Managetto-Pinto donatı modeli (b) Mander vd. beton modeli

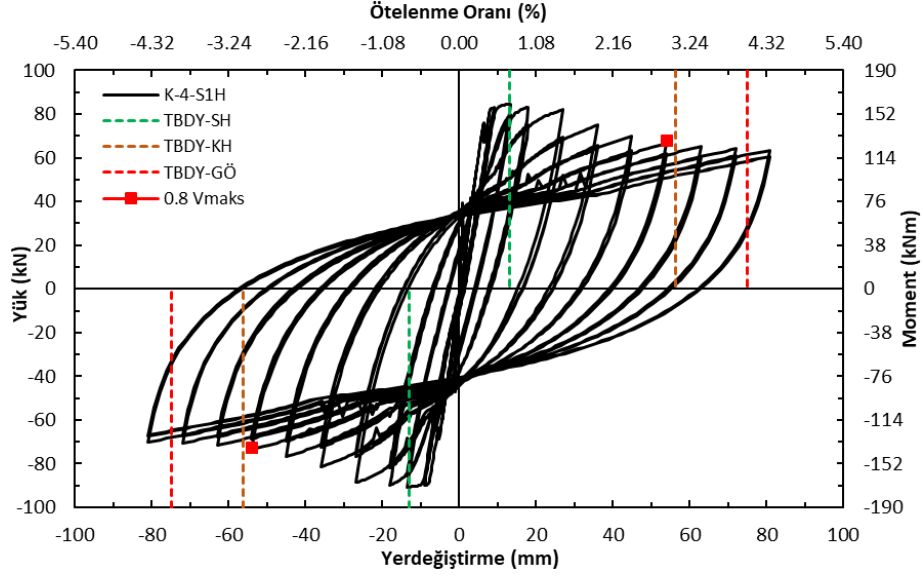
DeneySEL sonuçlar ile karşılaştırma amacıyla üretilen doğrulama modellerinde Managetto-Pinto modelinin gerçek davranışa yakın olacak şekilde dayanım azalmasını sağlama amacıyla A1 parametresi 19.55 seçilerek tüm kiriş modellerinde aynı değer kullanılmıştır. Kiriş davranışına etkileyecek olan sarılma bölgesi ile kiriş açıklığı bölgesi iki ayrı kesit olarak tanımlanmıştır. Sarılma bölgelerinde etriye sıklaştırması yapılarak 75 mm aralık ile tasarlanmış ve açıklıkta etriye aralığı 150 mm olarak modellenmiştir. Kirişin bu iki bölgesi programda iki farklı kesit olarak tanımlanması sebebiyle doğrulama kirişlerinde de bu durum dikkate alınmıştır. Bu amaçla, deneysel veriler ile karşılaştırılan modellerde iki farklı kesit tasarlanarak, etriye aralığı aynı tutulmuş ve davranış doğru yansıttığı görülmüştür. İki farklı modelleme ile yansıtılan sarılma bölgesinin etkisi bu sayede analitik modele yansıtılmıştır. Programda modellenen kirişin görünüşü Şekil 8’de gösterilmektedir.



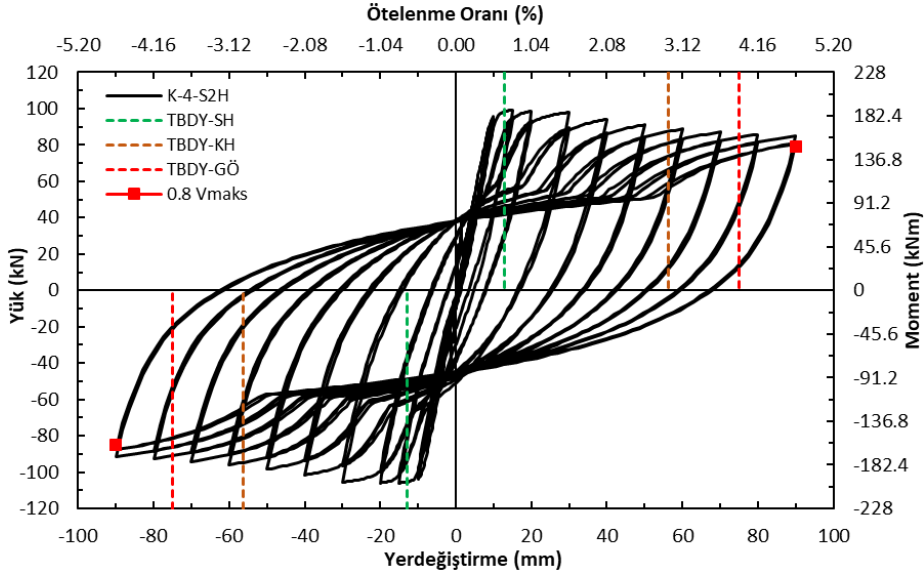
Şekil 8: Seismo-Struct 2020 programında yapılan model görüntüsü

3. Analitik Sonuçlar

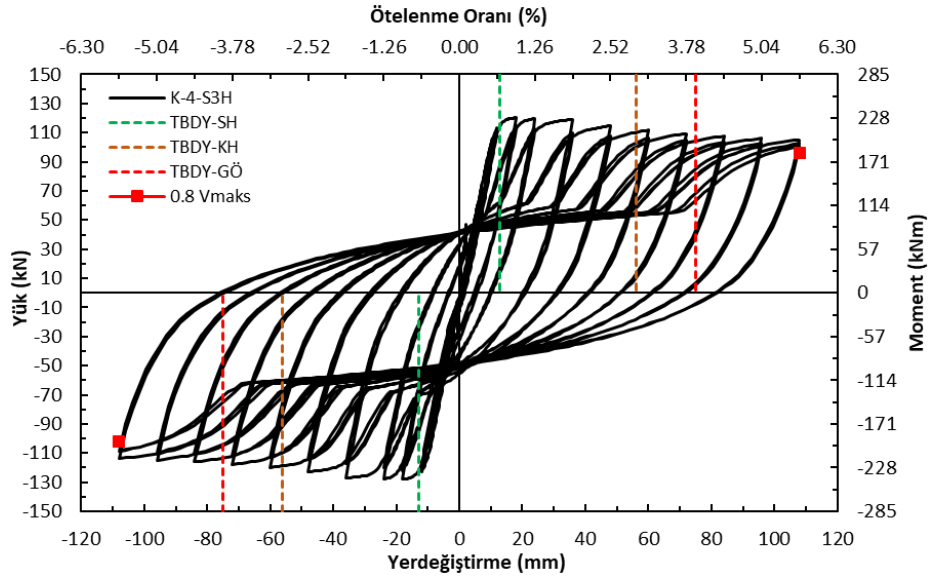
Deprem yüklerinden benzeştirilen artan genlikli çevrimsel yükleme altında gerçekleştirilen sismik analiz sonrası elde edilen analitik sonuçlar Şekil 9-17’de gösterilmektedir. Kirişlere ait yük-yer değiştirme eğrileri üzerinde TBDY-2018’e göre hesaplanan performans düzeyleri 1-5 bağıntıları yardımıyla hesaplanarak üzerine işlenmiştir. Ayrıca yatay yük taşıma kapasitesinde %20 azalmaya karşılık gelen yer değiştirme talebi kontrol amacıyla eğri üzerinde işaretlenmiştir.



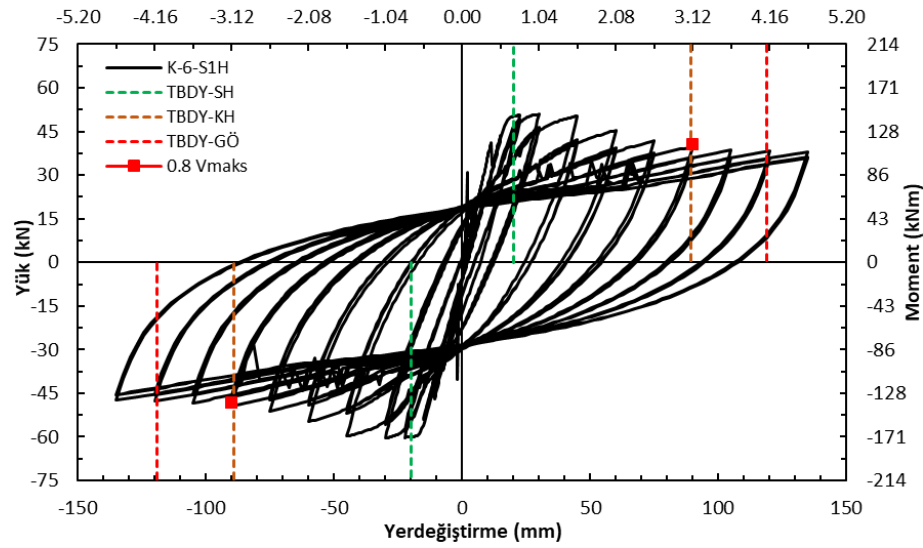
Şekil 9: K-4-S1H kirişine ait yük-yer değiştirme ilişkisi



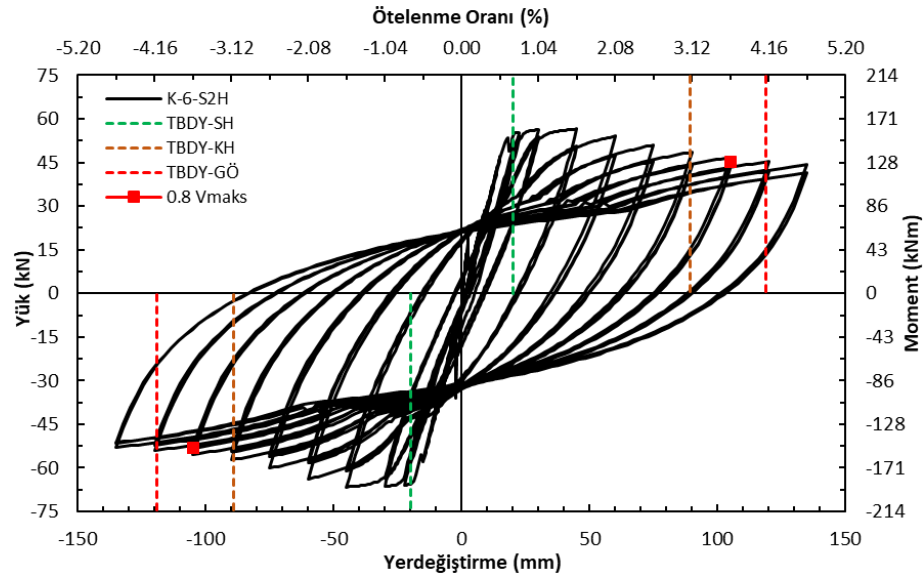
Şekil 10: K-4-S2H kirişine ait yük-yer değiştirme ilişkisi



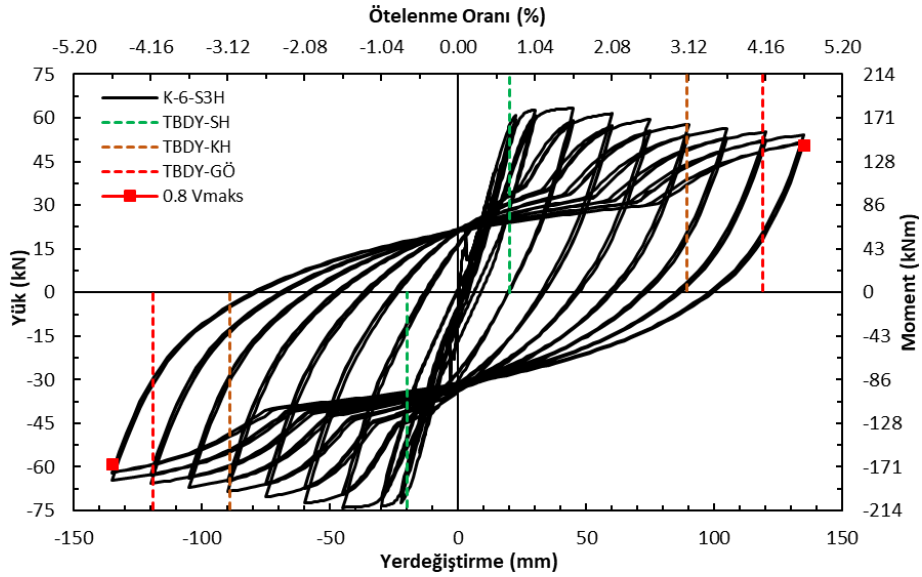
Şekil 11: K-4-S3H kirişine ait yük-yer değiştirme ilişkisi



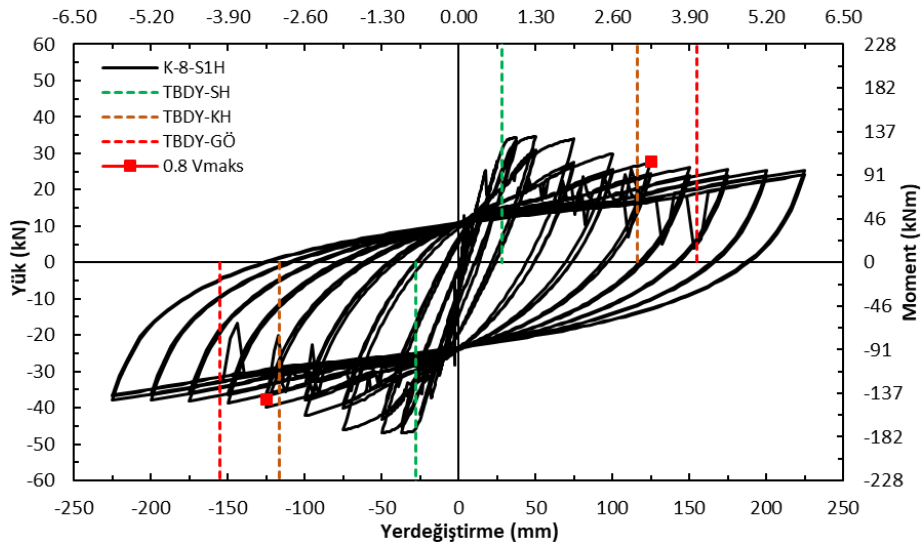
Şekil 12: K-6-S1H kirişine ait yük-yer değiştirme ilişkisi



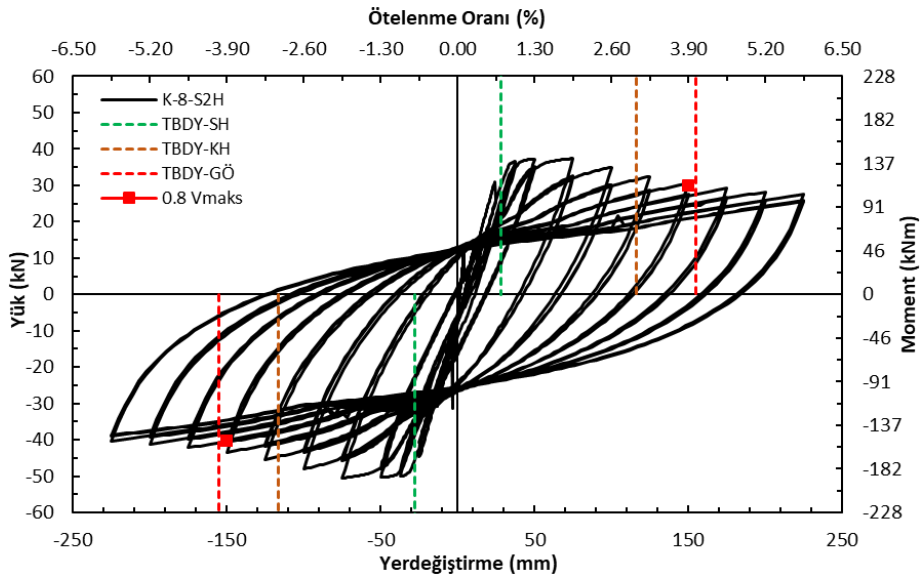
Şekil 13: K-6-S2H kirişine ait yük-yer değiştirme ilişkisi



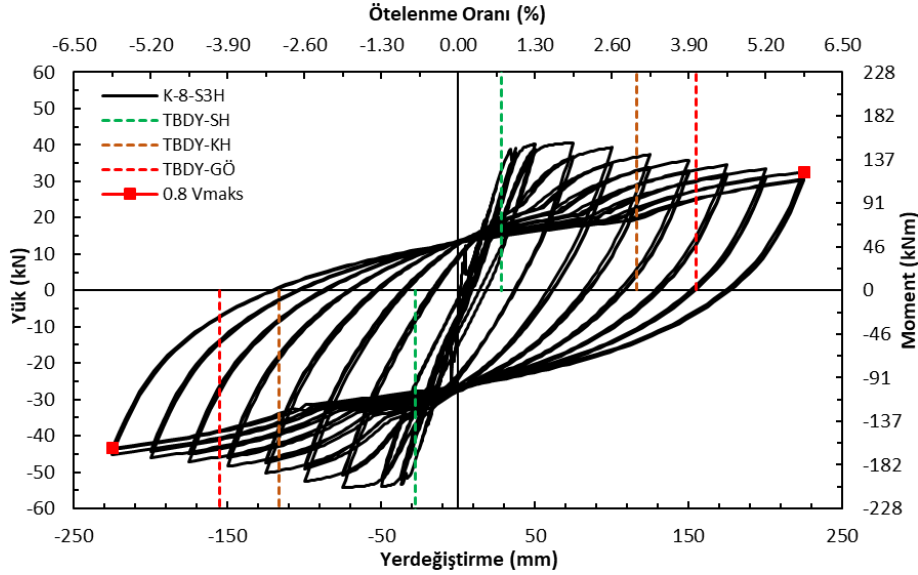
Şekil 14: K-6-S3H kirişine ait yük-yer değiştirme ilişkisi



Şekil 15: K-8-S1H kirişine ait yük-yer değiştirme ilişkisi



Şekil 16: K-8-S2H kirişine ait yük-yer değiştirme ilişkisi



Şekil 17: K-8-S3H kirişine ait yük-yer değiştirme ilişkisi

Kirişlere ait yük-yer değiştirme ilişkileri incelendiğinde tespit edilen sonuçlar Tablo 2’de özetlenmektedir.

Tablo 2: Kirişlere ait kapasite tahminindeki hata yüzdeleri

Kiriş Adı	$\Delta^{(G0)}$ (TBDY-2018) (mm)	$\theta^{(G0)}$ (TBDY-2018)	$\Delta_{0.8V_{max}}$ (mm)	$\theta_{0.8V_{max}}$	Bağlı Hata (%)
K-4-S1H	75	0.041	54	0.028	+38.8
K-4-S2H	75	0.041	90	0.047	-16.6
K-4-S3H	75	0.041	108	0.056	-30.5
K-6-S1H	119	0.041	90	0.031	+32.2
K-6-S2H	119	0.041	105	0.036	+13.3
K-6-S3H	119	0.041	135	0.047	-11.8
K-8-S1H	155	0.041	125	0.032	+24.0
K-8-S2H	155	0.041	150	0.039	+3.3
K-8-S3H	155	0.041	225	0.059	-31.1

Tablo 2 incelendiğinde görülen sonuçlar maddeler halinde sıralanmıştır:

TBDY-2018’de tanımlanmış kiriş sarılma bölgesinin uzunluğu 1h olan kirişler kapasiteyi fazla tahmin etmektedir. TBDY-2018 için kiriş sarılma bölgesi 1h durumunda uygun olmadığı üç a/d oranı içinde görülmektedir.

- Kiriş sarılma bölgesi 2h olan kirişlerde a/d oranı düşük kirişlerde güvenli sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Buna karşın a/d oranı yüksek olan kirişlerde (K-6-S2H, K-8-S2H) kapasiteyi olması gereken değerden fazla tahmin etmektedir.
- Kiriş sarılma gölgesi 3h olan kirişlerde ise a/d oranından bağımsız olarak güvenli sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Özellikle a/d oranı yüksek kirişlerde sarılma bölgesi uzunluğundaki artış sonuçları güvenli hale getirmektedir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında, kiriş sarılma bölgesi uzunluğu ile a/d oranı arasındaki etkileşim araştırılmıştır. Bu bağlamda üretilen analitik modeller benzer yükleme durumları altında sismik analizi sonucunda davranışları incelenmiştir. Bu bağlamda elde edilen sonuçlar maddeler halinde sıralanmıştır.

- TBDY-2018’de 2h olarak tanımlanan kiriş sarılma bölgesi uzunluğunun a/d oranı düşük olan kirişlerde uygun sonuçlar verdiği ve ihtiyatlı kaldığı görülmüştür.
- İmar yönetmeliğinde izin verilen ve mimari gereksinim gereği kolonlar arası açıklık yüksek seçilen yapılarda a/d oranı 7-10 arasında olan kirişler olabilmektedir. Bu durumda kiriş sarılma bölgesi uzunluğunun a/d oranından etkilendiği ve TBDY-2018’e göre güvensiz sonuçlar verebileceği görülmüştür. Kısıtlı sayıda modele göre yapılan analiz sonucunda kiriş sarılma bölgesi uzunluğunun, a/d oranı 5 ve üstü olduğu durumlarda 3h mertebesinde kabul edilmesinin daha güvenli tasarım yapılmasına yardımcı olacağı düşünülmektedir.

- TBDY-2018’de kiriş sarılma bölgesinin uzunluğu; kiriş yüksekliğine bağlı olarak belirlenmektedir. Kiriş açıklığının yüksek olduğu durumlarda güvenli sonuçlar vermemesi sebebiyle, kiriş sarılma bölgesi uzunluğunu belirlemede ilave parametrelerin etkisini dikkate alması yönetmeliği daha güvenli kılacaktır. Kısıtlı sayıda yapılan model üzerinden elde edilen sonuçların literatüre katkı yaparak sonraki çalışmalara ışık tutacağı düşünülmektedir.

Referanslar

ACI 318 (2011), Building code requirements for structural concrete and commentary, American Concrete Institute; Farmington Hills, MI, USA.

Aydemir, C., Eser Aydemir, M., & Yıldırım, P. (2020). “Belirgin Düşey Yük Etkisindeki Betonarme Kirişlerin Çevrimsel Yükler Altındaki Davranışı Üzerine Deneysel Bir İnceleme.” *Teknik Dergi*. doi: 10.18400/tekderg.34140.

Aykaç, S , Tankut, T , Can, H . (2011). Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Deprem Davranışı. *International Journal of Engineering Research and Development* , 3 (2) , 42-46 . Retrieved from <http://dergipark.org.tr/tr/pub/umagd/issue/31722/345746>.

CEN (2003), “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistant, Part 1”, Comité Européen de Normalisation, Brussels.

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik DBYBHY (2007), Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.

Ersoy U., Betonarme Kiriş ve Kolonların Moment Kapasitelerinin Saptanması, *Teknik Dergi*, 9(4), 1781-97, 1998.

FEMA-356. (2000), “Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings” Report No. FEMA-356, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

Foroughi, S , Yüksel, S . (2019). Betonarme Kolonların Şekil Değiştirme Esaslı Hasar Sınırlarının Araştırılması. *International Journal of Engineering Research and Development* , 11 (2) , 584-601 . DOI: 10.29137/umagd.519208.

Mörsch, E., Concrete-Steel Construction (Der Eisenbetonbau), Almanca 3.ncü baskıdan İngilizce çeviri (1909), Ed: Goodrich, E.P. McGraw-Hill Book Company, New York, 1902.

Özkal, F. M. (2017) “Kesme Açıklığı Küçük Olan Betonarme Kirişlerin Etriye Düzeni Ve Kenetlenme Yönünden İncelenmesi.” 20. Ulusal Mekanik Kongresi, Bursa.

Poland, C. D., Hill, J., Sharpe, R. L., Soulages, J., Structural Engineers Association of California., & California. (1995). Vision 2000: Performance based seismic engineering of buildings. Sacramento, CA: Structural Engineers Association of California.

SeismoSoft, S. (2020). A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures. Disponível online em: <http://www.seismosoft.com>.

TS 500, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları (ICS 91.080.40), Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 2000.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği TBDY (2018), Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.



Uçak Çakışma Saptama ve Çözümleme Problemi için Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama Modeli Yaklaşımı

A Mixed Integer Linear Programming Approach for Aircraft Conflict Detection and Resolution Problem

Ramazan Kürşat Çeçen

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir Meslek Yüksek Okulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, 26110 Eskişehir, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 13/05/2020

Kabul / Accepted: 02/02/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 04/02/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Hava taşımacılığındaki talep artışı gerek hava sahalarında gerekse havaalanlarında ciddi trafik yoğunluğuna neden olmaktadır. Bu yoğunluk hem gecikmelere hem de uçaklar arasında çakışmalara neden olabilmektedir. Bu çalışmada, uçaklar arasında oluşacak çakışmaların önlenmesi amacıyla uçak çakışma saptama ve çözümleme konusu ele alınmış ve problemin çözümü için karma tam sayılı doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Önerilen matematiksel modelin test edilmesi için bir referans durum üretilmiştir. Bu referans durum hava sahasında ilk gelen ilk hizmet alır prensibi ile çakışmaların çözümlenmesini sağlamaktadır. Önerilen model ile toplam gecikme süresi ve gecikmeden kaynaklı toplam yakıt tüketiminin en küçükleme amaçlanmıştır. Bu amaç fonksiyonları hem tek başlarına hem de birlikte ele alınarak oluşturulan referans durum ile karşılaştırılmıştır. Test problemlerinden elde edilen sonuçlara göre gecikmeden kaynaklı toplam yakıt tüketiminde ve toplam gecikme süresinde referans duruma göre %17,3 ve %3,2 oranlarında iyileşmeler meydana gelmiştir. Her iki amaç fonksiyonunun birlikte ele alındığı durumda ise yakıt tüketiminde %15,2 oranında bir azalma saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Uçak çakışma saptama ve çözümleme, Hava trafik yönetimi, karma tam-sayıllı doğrusal programlama, yakıt tüketimi, gecikme süresi”

Abstract

An increasing demand in air transportation leads to a significant rise in traffic density both at airspaces and at airports. This rise in air traffic density may cause both delays and conflicts between aircraft pairs. Aircraft conflict detection and resolution problem is discussed in this study and a mixed integer linear programming model is proposed for this problem. A baseline case was generated to test the proposed mathematical model. The baseline case decides which aircraft receive delay for the resolution of conflicts, with the principle of the first come first served. The proposed model minimizes total delay time and total fuel consumption due to delay. These objectives were compared with the baseline considering the functions both individually and together. According to the results, the enhancement of the total fuel consumption due to delay and total delay duration are 17.3% and 3.2% compared to the baseline cases. When the two functions are considered together, 15.2% reduction in fuel consumption was obtained.

Key Words

“Aircraft conflict detection and resolution, air traffic management, mixed integer linear programming, fuel consumption, airborne delay”

1. Giriş

Hava taşımacılığında artmakta olan talep ile hava trafik sayılarında da artış meydana gelmiştir. Bu durum mevcut hava trafiğin yönetilmesini daha da karmaşık bir hale getirerek uçaklar arasındaki emniyetli ayırma ihlali oluşmasına ve hava trafik kontrolörlerinin iş yüklerinin artmasına neden olmaktadır. Artan hava aracı sayısı uçaklar arasındaki çakışmaların saptanması ve çözülmesi için gelişmiş teknolojik aletlere olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Uçaklar arasındaki emniyetli ayırma mesafesi yol aşaması hava sahaları için yatay düzlemde 5 deniz mili (nm) ve dikey düzlemde de 1000 feet olarak kabul edilmektedir. (ICAO, 2007) Oluşabilecek çakışmalar ise hava trafik kontrolörlerinin müdahaleleri ile önlenmektedir. Bu müdahaleler baş açısı değişikliği, hız değişikliği ve irtifa değişimi olarak üç farklı talimat ile gerçekleştirilebilmektedir. Her bir tekniğin kullanılmasında uçak performans kısıtları ve hava trafiğinin durumu büyük önem arz etmektedir. Uçak çakışma saptama ve çözümü konusunda hava trafiğinin emniyetli ve verimli bir şekilde sürdürülmesi için çok önemlidir.

Uçak çakışma saptama ve çözümü konusunda günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada uçak çakışma saptama ve çözümü probleminin matematiksel bir model önerildiği için aşağıda incelenen çalışmalar bu konu hakkında olacaktır. Kuchar ve Yang (2000) yayınladıkları derleme makalesinde bu konu hakkında 2000 yılına kadar yapılmış olan çalışmaları sunmuşlardır. Benzer bir şekilde, Martin Campo (2010) yaptığı bir çalışmada 2010 yılına kadar olan uçak çakışma saptama ve çözümü çalışmaları hakkında detaylı bir bilgi vermiştir. Richards ve How (2002) bu problemin çözümü için karma tam sayılı doğrusal bir model önererek uçakların yörüngeleri boyunca hangi noktalar üzerinden geçeceklerine karar vererek uçaklar arasında emniyetli ayırmanın sağlanmasını amaçlamıştır. Pallottino vd. (2002) karma tam sayılı doğrusal bir model geliştirerek uçakların arasındaki ayırmaları uçak pozisyonlarının geometrik yapısına bağlı olarak ya hız kısarak ya da baş açısı değişikliği uygulayarak sağlamıştır. Christodoulou ve Costoulakis (2004) ise Pallottino vd. (2002)'nin önerdiği modeli geliştirerek uçaklar arasındaki çakışmaları hem baş açısı hem de hız değişikliği yöntemi ile engellemiştir. Bu model küçük boyutlu test problemleri üzerinde denenmiştir. Vela vd. (2009) karma tam sayılı doğrusal bir model önererek uçak çakışmaları için hız ve irtifa değişikliklerini bir arada kullanmıştır. Bu modelde uçakları bütün hava sahasında kontrol etmeden sadece potansiyel çakışma noktalarında kontrol ederek çakışmaların saptanması ve çözülmesi sağlanmıştır. Alonso Ayuso vd. (2012, 2016a), uçak çakışma saptama ve çözümü probleminin çözümü için iki farklı karma tam sayılı doğrusal olmayan model önermiştir. Bu çalışmaların birincisinde sadece hız değişikliği yöntemini kullanarak ivmelenmenin en küçüklenmesini amaçlamış diğerinde ise sadece baş açısı değişikliği yöntemini kullanarak uçakların tekrar orijinal yörüngesine dönmesi sağlanmıştır. Bunlara ek olarak, Alonso Ayuso vd. (2016b) ayrıca çok amaçlı karma tam sayılı doğrusal olmayan bir model önerisinde bulunmuştur. Bu model hız değişikliği, baş açısı değişikliği ve irtifa değişikliği yöntemlerini hep birlikte kullanmıştır. Bu çalışmada, hedef programlar yardımıyla sırasıyla toplam hız değişikliğini, toplam baş açısı değişikliğini ve toplam irtifa değişikliğini en küçüklemeye çalışmıştır. Cafieri ve Durand (2014) uçak çakışmalarını önlemek için karma tam sayılı doğrusal olmayan bir model önermiş ve sadece hız değişikliği yöntemini kullanmıştır. Ayrıca problemin karmaşıklığından dolayı sezgisel bir yöntem de önermişlerdir. Cafieri ve Rey (2017) Cafieri ve Durand (2014)'dan farklı bir MINLP modeli sunmuşlardır. Çakışmanın olmadığı en büyük uçak setini elde etmeyi bunu da hız değişikliği manevrası kullanarak yapmayı amaçlamışlardır. Benzer bir şekilde, Cafieri ve Omheni (2017) baş açısı ve hız değişikliği yöntemlerini sırayla kullanan başka bir karma tam sayılı doğrusal olmayan bir model sunmuşlardır. Elde edilen sonuçlara göre, her iki manevranın birlikte kullanılmasının çakışma çözümüne olumlu bir katkı yaptığı gözlemlenmiştir. Hong ve arkadaşları (2017), baş açısı ve hız değişikliği yöntemlerini kullanan karma tam sayılı doğrusal olmayan bir model önermiştir. Bu modelde, çakışmaları çözmek için parçacık sürüsü algoritmasını kullanmıştır. Çeçen ve Çetek (2019) uçak çakışma saptama ve çözümü problemi için iki aşamalı bir matematiksel model önermişlerdir. Bu modelin ilk aşamasında çoklu giriş noktası yaklaşımını kullanarak mevcut çakışmaların çözülmesi ve bu yaklaşımın bütün çakışmaların çözümünde yeterli olmaması durumunda ise çözümlenemeyen çakışmaların çözümü sürelerinin en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, ilk aşamada çözüme ulaşmak için hem genetik algoritma hem de yasaklı arama algoritması kullanılmıştır. İkinci aşamada ise çözümlenemeyen çakışmalar için çakışan uçaklara bir vektör manevrası yaptırılarak tüketilen yakıtın en küçüklenmesi sağlanmıştır. Cai ve Zhang (2019) uçak çakışma saptama ve çözümü konusunda karma tam sayılı doğrusal olmayan bir model geliştirmiş ve modelde irtifa ve hız değişimlerini kullanarak uçaklar arasındaki emniyetli ayırma sağlamıştır. Model büyük boyutlu problemleri kesin çözüm garanti eden çözümlerle kısa süre içinde çözmeyi başarmıştır. Çeçen ve Çetek (2020), Çeçen ve Çetek (2019)'den farklı olarak çoklu giriş noktası yaklaşımını hız değişikliği yöntemi ile birleştirerek karma tam sayılı doğrusal bir model önermiş ve problemin çözümü için sezgisel bir algoritma geliştirmişlerdir. Bu modelde toplam giriş noktası değişikliği, toplam hız değeri değişikliği ve çakışma çözümleri için gerekli toplam sürenin tek bir amaç fonksiyonu halinde en küçüklenmesi hedeflenmiştir. Model çok sayıda test problemi üzerinde test edilmiş ve giriş noktası değişikliğinin hız değişimi ile kullanılması durumunda bütün çakışmaların çözümlendiği belirtilmiştir. Çeçen vd. (2020) seyir aşamasındaki uçakların çakışmalarının önlenmesi için iki aşamalı bir matematiksel model önermişlerdir. Modelin ilk aşamasında uçakların irtifa değişimi sayesinde çakışmalardan kaçınması hedeflenmiştir. Eğer bu çözüm yöntemi yeterli olmaz ise, ikinci aşamada ise irtifa değişikliği yapılmadan sadece vektör manevrası yapılarak çakışmaların çözülmesi amaçlanmıştır. Modelin çözümü için ise tavlama benzetimi algoritması kullanılmıştır.

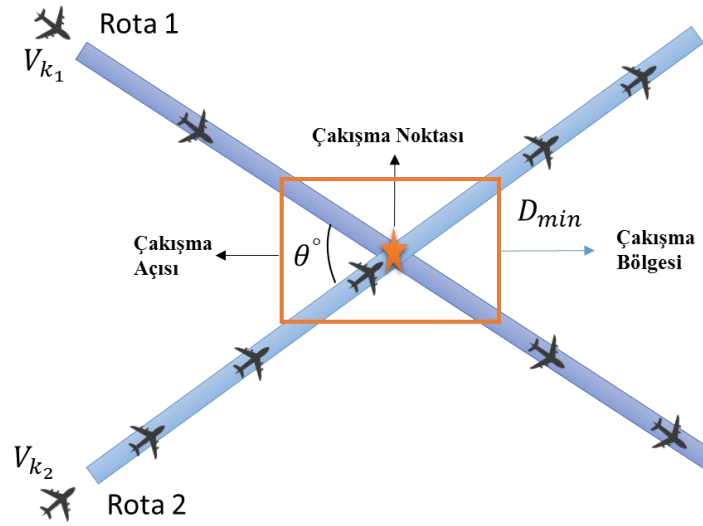
Bu çalışmada, uçak çakışma saptama ve çözümü probleminin çözümü için karma tam sayılı doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Önerilen modelde uçakların seyir aşamasında bulunduğu ve çakışma çözümlerinin vektör manevrası yardımı ile yapıldığı kabul edilmiştir. Bu manevradan dolayı uçakların maruz kalacakları toplam gecikme süreleri ile gecikmeden kaynaklı toplam yakıt tüketimlerinin hem ayrı ayrı hem de birlikte en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Önerilen modelin test edilmesi için bir referans durum hazırlanmıştır. Bu referans durumda ilk gelen ilk hizmet alır (First In First Out-FIFO) prensibi kabul edilerek çakışma noktasına ilk gelen uçağa herhangi bir gecikme uygulanmadan, ikinci gelen uçağa ise gerekli gecikmenin verilmesi için vektör manevrası

yaptırılmaktadır. Ayrıca çalışmada çok sayıda uçak çeşidi kullanılarak hız ve yakıt tüketim değerlerindeki farklılıkların amaç fonksiyonları üzerindeki etkisinin görülmesi hedeflenmiştir. Önerilen bu model ile farklı amaç fonksiyonlarının referans duruma göre nasıl bir değişiklik meydana getirdiği hesaplanarak sunulmuştur.

Makalenin 2. bölümünde ele alınan problem tanımlanmış, 3. bölümde önerilen matematiksel model takdim edilmiş, 4. bölümde deneysel sonuçlar sunulmuş ve son bölümde ise bulunan sonuçlar tartışılmıştır.

2. Problemin Tanıtılması

Uçak çakışma saptama ve çözümü problemi hava trafiğinin emniyetli bir şekilde sunulması için çok önemlidir. Bu problem havaalanlarında, terminal kontrol sahalarında ve saha kontrol merkezlerinde yaşanabilmektedir. Havaalanlarında uçaklar arasında iniş ve kalkış operasyonlarının düzenlenmesinde ve yerdeki hareketlerinde emniyetli ayırma ihlali meydana gelebilmektedir. Benzer bir şekilde, terminal hava sahalarında ise uçakların iniş sıralaması yapılırken emniyetli ayırma ihlalleri oluşabilmektedir. Saha kontrolü ise uçakların seyir uçuşlarını gerçekleştirdiği hava sahalarıdır. Bu bölüm toplam hava sahaları içinde en büyük bölümü oluşturmaktadır. Bu hava sahalarında iki farklı çakışma durumu meydana gelebilmektedir bunlar aynı ve kesişen rota çakışmalarıdır. Bu çalışmada uçak çakışma saptama ve çözümü probleminin saha kontrol merkezinde gerçekleştiği kabul edilmiştir. Önerilen modelde amaç fonksiyonları arasındaki ilişkinin ortaya konması için basit ve kesişen bir hava sahası yapısı kullanılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Önerilen hava sahasının bir uçuş seviyesi için görünümü

Şekil 1’ de görüleceği üzere kullanılan hava sahasında iki farklı rota, beş farklı uçuş seviyesi (FL) ve her bir irtifa için bir kesişme noktası bulunmaktadır. Uçakların rota bilgileri, giriş ve çıkış noktaları ve uçuş seviyeleri modele parametre olarak eklenmektedir. Her iki rotanın uzunluğu 100 nautical mile (NM) ve kesişme noktasına olan uzaklıkları ise 50 NM olarak belirlenmiştir. Uçakların farklı rotaları kullanmaları durumunda ise ortak bir çakışma noktasına uğrayarak seyahatlerine devam etmeleri gerekmektedir. Uçaklar arasında emniyetli ayırma mesafesi, D_{min} , 5 NM olarak kabul edilmiştir. Uçaklar arasındaki emniyetli ayırma mesafelerinin korunması için zaman ayırması yöntemi kullanılmaktadır. Aynı rotadaki çakışmalar hem giriş noktasında hem de çıkış noktasında kontrol edilmektedir. Bu yöntem ile uçakların birbirlerini geçmesi engellenmiştir. Kesişen rotalarda bulunan iki uçak arasındaki emniyetli ayırma zamanı,

$$T_{k_1k_2j} = \frac{D_{min}}{V_{k_1j} V_{k_2j} |\sin(\theta)|} \sqrt{(V_{k_1j})^2 + (V_{k_2j})^2 - 2V_{k_1j} V_{k_2j} \cos(\theta)} \quad (1)$$

$T_{k_1k_2j}$, uçaklar arasındaki çakışma açısına, θ , ve uçakların hızlarına, V_{k_1j}, V_{k_2j} , göre değişmektedir (Carlier vd. (2013)). Bu çalışmada her bir uçuş seviyesi için kesişme açısı sabittir. Bu çalışmada üretilen bütün senaryolarda referans durum ile önerilen modellerin sonuçların karşılaştırılmasında kullanılmak üzere dar gövdeli (DG) ve geniş gövdeli (GG) uçak tiplerinden oluşan on farklı uçak çeşidi bulunmaktadır. Her bir uçak tipi 5 farklı uçak çeşidi bulundurmaktadır. Uçaklar arasındaki emniyetli ayırma zamanını uçakların çeşitleri etkilemektedir çünkü her bir uçağın uçuş hızı farklı olduğu için aynı performans kategorisine sahip olan farklı uçak çiftleri arasında farklı zaman ayırmaları gerekebilmektedir. Yapılan çalışmada ise FL290 (uçuş seviyesi 29000 feet), FL310, FL330, FL350 ve FL370 uçuş seviyeleri kullanılmıştır. Her bir seviyede uçak hızları ve yakıt tüketimleri BADA 3.11’de belirtilen operasyonel hızlar olarak seçilmiştir ve Tablo 1’ de sunulmuştur.

Tablo I. Uçakların farklı uçuş seviyeleri için uçuş hızları (NM/saat) ve yakıt tüketim değerleri (kg/dakika)

Uçak Çeşidi	FL290	FL310	FL330	FL350	FL370
DG1	462/ 44,9	458/ 42,4	454/ 40,2	450/ 38,4	447/ 36,3
DG2	431/ 43	444/ 43,2	454/ 42,6	450/ 42,6	447/ 40,5
DG3	459/ 43,6	458/ 41,1	454/ 38,4	450/ 38,4	447/ 36
DG4	459/ 54,6	458/ 52,1	454/ 49,6	450/ 49,6	447/ 47,4
DG5	444/ 35,5	440/ 33,4	436/ 31,6	432/ 31,6	430/ 30,1
GG1	485/ 108,7	481/ 101,7	477/ 95,3	473/ 95,5	470/ 90
GG2	473/ 89,1	469/ 85	465/ 81,4	461/ 78,4	459/ 70,2
GG3	485/ 110,7	481/ 104,2	477/ 110,7	473/ 93,7	470/ 89,8
GG4	497/ 179,4	493/ 170,9	489/ 163,7	484/ 158	482/ 153,8
GG5	473/ 115,3	487/ 115,8	489/ 111,6	484/ 106,4	482/ 102,3

Uçakların doğuya doğru gittiği, rüzgâr hızının 0 NM/saat olduğu, uçuşları sırasında hız ve irtifa değişikliği yapmadığı kabul edilmiştir.

3. Matematiksel Model

Uçak çakışma saptama ve çözümleme probleminin çözümü için önerilen karma tam sayılı doğrusal modelde toplam gecikme süresi ve gecikmeden kaynaklı toplam yakıt tüketiminin ayrı ayrı ve birlikte olarak 3 farklı amaç fonksiyonu halinde en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Üçüncü amaç fonksiyonu ise ağırlıklı toplam yöntemi kullanılarak her iki amaç fonksiyonunun kullanılması ile hesaplanmıştır. Ayrıca, her iki amaç fonksiyonu için ağırlıklar $e_1 = 0.5$ ve $e_2 = 0.5$ olarak belirlenmiştir. Amaç fonksiyonu (18)'de verilen her iki amaç fonksiyonunun birimleri arasındaki farklılıkların ortadan kaldırılması için normalleştirilme işlemi uygulanmıştır ve bu sayede amaç fonksiyonları 0 ile 1 arasında bir değer alabilir bir hale dönüştürülmüştür. Normalleştirme işlemi uygulamadan önce ise amaç fonksiyonlarının ideal ve nadir noktaları bulunmuştur. Amaç fonksiyonları (16) ve (17) kısıt (2) -(13) arasındaki kısıtları kullanarak sırası ile w_{min} ve y_{min} değerleri hesaplanmıştır. Amaç fonksiyonu (18)'in hesaplanması için nadir noktaları w_{max} ve y_{max} amaç fonksiyonu (16) için kısıtlar (2) -(13), (15)'i ve amaç fonksiyonu (17) için ise kısıtlar (2) -(13), (14)'ü kullanılarak sırası ile hesaplanmıştır.

3.1. İndisler

i, i_1, i_2 : Uçak ($i=1, \dots, n$)

3.2. Parametreler

n : Uçak sayısı
 l_1 : Rotaların kesişme noktasına olan uzaklığı
 l_2 : Uçuş rotalarının uzunluğu
 $v_{A_i F_i}$: A_i . uçak çeşidinin F_i . uçuş seviyesindeki hızı
 r_i : i. uçağın hangi rotayı kullandığı bilgisi
 g_i : i. uçağın hava sahasına beklenen giriş zamanı
 A_i : i. uçağın hangi uçak çeşidi olduğu bilgisi
 F_i : i. uçağın hangi uçuş seviyesinde olduğu bilgisi
 $yt_{A_i F_i}$: A_i . uçak çeşidinin F_i . uçuş seviyesindeki birim zamandaki yakıt tüketimi
 w_{max} : en küçük toplam gecikme süresi için elde edilen toplam yakıt tüketiminin değeri
 y_{max} : en küçük toplam yakıt tüketimi için elde edilen toplam gecikme süresinin değeri
 w_{min} : en küçük toplam yakıt tüketimi
 y_{min} : en küçük toplam gecikme süresi
 e_1 : ağırlık katsayısı
 e_2 : ağırlık katsayısı
 $T_{A_{i_1} A_{i_2} F_i}$: Aynı rota kullanan uçaklar için, A_{i_1} . uçak çeşidi ile A_{i_2} . Uçak çeşidi arasında F_i . uçuş seviyesindeki zaman ayırması
 $S_{A_{i_1} A_{i_2} F_i}$: Farklı rotaları kullanan uçaklar için, A_{i_1} . uçak çeşidi ile A_{i_2} . Uçak çeşidi arasında F_i . uçuş seviyesindeki kesişme noktasındaki zaman ayırması

3.3. Karar Değişkenleri

w_i : i. uçağın gecikme süresi
 q_i : i. uçağın hava sahasına gerçek giriş zamanı
 e_i : i. uçağın kesişme noktasından geçiş zamanı
 d_i : i. uçağın hava sahasından çıkış zamanı
 y_i : i. uçağın yakıt tüketimi
 $c_{1i_1 i_2}$: i_1 . uçağın i_2 . uçaktan önce aynı rotadan hava sahasına giriş ve çıkış yaparsa 1; diğer durumda 0
 $c_{2i_1 i_2}$: i_1 . uçağın i_2 . uçaktan önce farklı rotaları kullanarak kesişme noktasında bulunursa 1; diğer durumda 0

3.4 Kısıtlar

(2), (3) ve (4) No.lu kısıtlar sırasıyla uçakların hava sahasına gerçek giriş zamanı ve gecikme süresini, kesişme noktasında bulunma zamanını ve hava sahasından çıkış zamanı hesaplamaktadır.

$$q_i = g_i + w_i \quad \forall i \quad (2)$$

$$e_i = g_i + \frac{l_1}{v_{A_i F_i}} \quad \forall i \quad (3)$$

$$d_i = g_i + \frac{l_2}{v_{A_i F_i}} \quad \forall i \quad (4)$$

(5), (6), (7) ve (8) No.lu kısıtlar sırasıyla aynı rotayı ve aynı uçuş seviyesini kullanan uçaklar arasındaki hem giriş hem de çıkış noktasında kontrol ederek uçaklar arasındaki emniyetli ayırmayı sağlar. Model c_{1,i_1,i_2} karar değişkini sayesinde hangi uçağın hava sahasına ilk giriş ve çıkış yapacağına karar vermektedir. c_{1,i_1,i_2} karar değişkeninin 1 değerini alması durumunda (5) ve (6) kısıtlar i_1 . uçağın i_2 . Uçağa göre daha önce hava sahasına girmesine ve çıkış yapmasına imkân vereceklerdir.

$$q_{i_2} - q_{i_1} \geq T_{A_{i_1}A_{i_2}F_{i_1}} - (1 - c_{1,i_1,i_2})M \quad \forall i_1, i_2 \mid i_1 \neq i_2, F_{i_1} = F_{i_2}, r_{i_1} = r_{i_2} \quad (5)$$

$$q_{i_1} - q_{i_2} \geq T_{A_{i_2}A_{i_1}F_{i_1}} - (c_{1,i_1,i_2})M \quad \forall i_1, i_2 \mid i_1 \neq i_2, F_{i_1} = F_{i_2}, r_{i_1} = r_{i_2} \quad (6)$$

$$d_{i_2} - d_{i_1} \geq T_{A_{i_1}A_{i_2}F_{i_1}} - (1 - c_{1,i_1,i_2})M \quad \forall i_1, i_2 \mid i_1 \neq i_2, F_{i_1} = F_{i_2}, r_{i_1} = r_{i_2} \quad (7)$$

$$d_{i_1} - d_{i_2} \geq T_{A_{i_2}A_{i_1}F_{i_1}} - (c_{1,i_1,i_2})M \quad \forall i_1, i_2 \mid i_1 \neq i_2, F_{i_1} = F_{i_2}, r_{i_1} = r_{i_2} \quad (8)$$

(9) ve (10) No.lu kısıtlar sırasıyla farklı rotaları ve aynı uçuş seviyesini kullanan uçaklar arasındaki emniyetli ayırmayı kesişme noktası üzerinde kontrol ederek sağlar.

$$e_{i_2} - e_{i_1} \geq S_{A_{i_1}A_{i_2}F_{i_1}} - (c_{2,i_1,i_2})M \quad \forall i_1, i_2 \mid i_1 \neq i_2, F_{i_1} = F_{i_2}, r_{i_1} \neq r_{i_2} \quad (9)$$

$$e_{i_1} - e_{i_2} \geq S_{A_{i_2}A_{i_1}F_{i_1}} - (1 - c_{2,i_1,i_2})M \quad \forall i_1, i_2 \mid i_1 \neq i_2, F_{i_1} = F_{i_2}, r_{i_1} \neq r_{i_2} \quad (10)$$

(11) No.lu kısıt uçakların gecikme sürelerinin (w_i) sağlanması için yaptıkları vektör manevrasında harcadıkları yakıt tüketimlerini (y_i) hesaplamaktadır.

$$y_i = f_i \cdot y_{t_{A_i F_i}} \quad \forall i \quad (11)$$

(12) ve (13) No.lu kısıtlar işaret kısıtlarıdır.

$$w_i, q_i, e_i, d_i, y_i \geq 0 \quad \forall i \quad (12)$$

$$c_{1,i_1,i_2}, c_{2,i_1,i_2} \in \{0,1\} \quad \forall i_1, i_2 \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i \leq w_{min} \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i \leq y_{min} \quad (15)$$

3.5. Amaç Fonksiyonu

(16), (17) ve (18) No.lu amaç fonksiyonları sırasıyla toplam gecikmeyi, gecikmeden kaynaklı toplam yakıt tüketimini ve her iki amaç fonksiyonunun birlikte hesaplanmasını sağlamaktadır. Bütün amaç fonksiyonları modelde kullanılmıştır. Üç farklı amaca göre hesaplanan sonuçlar deneysel sonuçlar bölümünde sunulmuştur.

$$enk \sum_{i=1}^n w_i \quad (16)$$

$$enk \sum_{i=1}^n y_i \quad (17)$$

$$enk e_1 \cdot \left(\sum_{i=1}^n \frac{w_i}{w_{max}} \right) + e_2 \cdot \left(\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{y_{max}} \right) \quad (18)$$

4. Deneysel Sonuçlar

Önerilen karma tam sayılı doğrusal programlama modelin test edilmesi için 30 farklı senaryo oluşturulmuştur. Trafik sayısı bütün uçuş seviyeleri için toplam 100 uçak olarak belirlenmiştir. Uçakların uçuş seviyeleri, uçak çeşitleri ve rotaları normal dağılıma göre, hava sahasına giriş zamanları ise üstel dağılıma göre belirlenmiştir ve senaryolarda kullanılan ilgili değerler Tablo II' de sunulmuştur. Tüm testler Intel (R) Core (TM) i7 CPU@ 2.3 GHz işlemcisi, 16 GB belleği olan bir bilgisayarda yapılmıştır.

Tablo II. Senaryo açıklamaları

Senaryo	Uçak çeşidine göre bulunan uçak sayısı										Uçak seviyesi sayısı					Rota sayısı	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	1	2
1	11	9	7	18	12	5	6	8	12	12	24	14	17	27	18	38	62
2	6	13	14	16	5	10	7	9	11	9	19	17	20	21	23	56	44
3	10	10	11	8	10	14	8	13	10	6	12	23	18	26	21	46	54
4	12	9	11	9	9	14	10	7	12	7	22	21	18	20	19	56	44
5	12	8	9	8	15	6	10	3	14	15	17	24	22	17	20	49	51
6	7	12	10	12	9	15	6	10	9	10	22	21	20	18	19	51	49
7	8	15	10	10	7	10	7	13	11	9	17	18	12	23	30	46	54
8	6	11	9	9	12	13	9	10	8	13	25	19	13	27	16	51	49
9	9	11	13	13	9	9	14	6	8	8	19	16	27	18	20	52	48
10	11	7	10	10	14	10	10	8	7	13	18	25	22	19	16	55	45
11	9	8	9	10	13	11	7	4	13	16	20	19	21	26	14	51	49
12	12	10	10	9	7	10	13	13	6	10	25	15	31	13	16	45	55
13	6	9	11	12	8	11	14	8	12	9	14	21	24	20	21	61	39
14	16	10	13	12	10	5	11	7	8	8	21	23	17	21	18	43	57
15	9	10	7	12	11	12	10	8	7	14	21	20	18	24	17	55	45
16	13	11	11	6	11	10	13	8	6	11	22	29	14	22	13	59	41
17	14	13	9	12	13	6	8	7	10	8	7	22	20	24	27	56	44
18	9	15	14	6	11	5	8	12	12	8	18	21	23	22	16	49	51
19	6	8	10	10	9	13	15	12	7	10	21	14	23	16	26	43	57
20	9	11	6	9	14	10	7	10	17	7	25	22	18	15	20	39	61
21	10	7	13	12	9	9	10	4	11	15	22	18	21	24	15	41	59
22	13	10	5	9	13	9	14	12	8	7	20	20	20	24	16	51	49
23	12	14	7	9	15	6	12	7	10	8	21	24	25	19	11	50	50
24	11	8	11	18	9	4	5	14	9	11	17	27	19	20	17	46	54
25	8	6	10	14	13	14	12	11	6	6	19	27	16	15	23	54	46
26	11	8	8	14	10	9	14	7	10	9	31	17	15	18	19	51	49
27	10	8	12	15	8	10	7	12	13	5	21	20	21	18	20	51	49
28	8	10	10	8	8	7	13	11	8	17	19	25	19	18	19	60	40
29	11	12	9	13	7	10	10	13	9	6	21	16	19	16	28	43	57
30	5	8	12	12	9	6	16	11	7	14	18	18	24	22	18	52	48

Matematiksel model GAMS 23.3 ile kodlanmış, çözücü olarak CPLEX kullanılmıştır. Matematiksel modelin elde ettiği sonuçlar Tablo III' te gösterilmiştir. Çizelgelerde ilk sütun senaryo numarasını, ikinci ve üçüncü sütunlar ilk gelen ilk hizmet alır yaklaşımı ile hazırlanan referans durumdaki yakıt (kg) ve gecikme (saniye) sürelerini göstermektedir. Dördüncü ve beşinci sütunlar gecikmeden

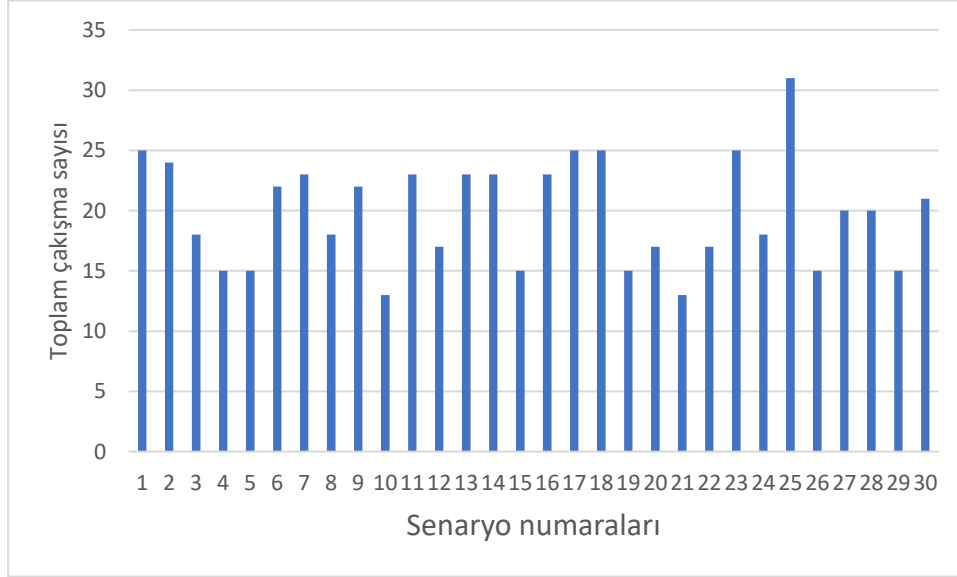
kaynaklı toplam yakıt tüketimini en küçüklendiği durumdaki yakıt ve gecikme sürelerini belirtmektedir. Altıncı ve yedinci sütunlar ise toplam gecikmenin en küçüklendiği durumdaki yakıt ve gecikme sürelerini göstermektedir. Son iki sütun ise toplam gecikmenin ve gecikmeden kaynaklı yakıt tüketimini birlikte en küçüklendiği yakıt ve gecikme sürelerini sunmaktadır.

Tablo III. Her bir amaç fonksiyonu için yakıt tüketimi (kg) ve gecikme (saniye) süreleri

Senaryo	Referans durum (FIFO)		Gecikmeden kaynaklı toplam yakıtın en küçüklenmesi		Toplam gecikmenin en küçüklenmesi		Gecikmeden kaynaklı toplam yakıtın ve toplam gecikmenin birlikte en küçüklenmesi	
	Yakıt	Gecikme	Yakıt	Gecikme	Yakıt	Gecikme	Yakıt	Gecikme
1	1102.7	1009.7	1040.8	1044.1	1072.7	969.9	1051.2	990.2
2	919.1	714.0	719.0	693.0	719.0	693.0	719.0	693.0
3	740.4	574.9	591.0	612.4	674.7	574.9	618.9	578.7
4	757.1	611.0	705.0	720.4	757.1	611.0	741.6	620.5
5	531.2	445.3	476.7	484.1	531.2	445.3	496.1	465.7
6	1191.0	919.3	924.1	1061.3	1064.2	780.5	1064.2	780.5
7	945.4	821.2	842.3	925.5	945.4	821.2	904.5	835.5
8	958.6	814.4	801.2	976.2	984.0	774.6	846.2	869.1
9	916.4	844.4	916.4	844.4	917.4	820.3	917.4	820.3
10	457.3	407.3	449.7	466.9	485.7	403.5	457.3	407.3
11	1501.8	1089.6	974.2	1133.5	1282.7	1016.3	984.1	1082.9
12	932.0	710.6	726.7	747.9	932.0	710.6	730.0	725.3
13	1005.6	1068.0	882.2	1163.4	1005.6	1068.0	892.9	1118.1
14	836.8	607.7	695.5	732.5	836.8	607.7	724.3	626.1
15	658.5	522.3	532.0	536.5	654.7	522.3	532.0	536.5
16	944.3	767.3	739.2	832.2	944.3	767.3	739.2	832.2
17	818.9	910.6	716.8	956.3	776.1	855.9	739.6	857.5
18	1623.3	1323.3	1156.2	1486.4	1524.2	1302.7	1160.9	1443.9
19	618.3	515.0	493.2	596.5	618.3	515.0	493.2	596.5
20	866.3	683.0	775.4	724.6	866.3	683.0	775.4	724.6
21	844.9	498.1	712.3	602.2	844.9	498.1	747.6	559.9
22	826.3	653.9	634.0	717.1	763.2	653.9	672.0	678.9
23	955.7	962.3	825.6	1018.7	918.5	962.3	825.1	1017.8
24	993.4	690.2	912.4	778.8	993.4	690.2	925.2	699.3
25	1350.4	1156.7	1180.2	1178.8	1350.4	1156.7	1180.2	1178.8
26	790.6	641.7	653.7	685.7	790.6	641.7	654.4	659.0
27	1061.2	1048.1	728.4	961.7	873.7	914.6	728.4	961.7
28	860.2	772.8	679.5	767.2	783.5	749.1	679.5	767.2
29	978.8	930.1	688.8	910.8	803.3	777.1	758.7	812.2
30	1197.6	783.5	1123.1	854.8	1135.0	753.5	1135.0	753.5
Ort.	939.5	783.2	776.5	840.5	895.0	758.0	796.5	789.7

Bu çalışmada referans durum ilk gelen ilk hizmeti alır yaklaşımı ile belirlenmiştir ve bu yaklaşım hava trafik kontrolörleri tarafından da kullanılmaktadır. Gecikmeden kaynaklı toplam yakıt tüketimini en küçüklendiği durumda ortalama yakıt tüketiminde referans duruma göre %17,3 oranında bir azalma meydana gelmiştir buna karşın ortalama gecikme süresinde ise %7,3 oranında bir artış yaşanmıştır. Ayrıca yakıt tüketim oranlarının 29 senaryoda referans duruma kıyasla daha iyi bir değer elde ettiği diğer kalan bir senaryoda ise referans durum ile aynı değere ulaştığı gözlemlenmiştir. Toplam gecikme süresinin sadece 4 senaryoda referans duruma göre daha iyi bir değer yakaladığı saptanmıştır. Buna ek olarak, toplam gecikmenin en küçüklendiği durumda ise ortalama gecikme süresinin referans duruma göre %3,2 oranında azaldığı ve ortalama yakıt tüketiminin de referans duruma göre %4,7 oranında azaldığı görülmüştür. Ayrıca toplam gecikme süresinin 13 senaryoda referans duruma kıyasla daha iyi bir değer elde ettiği diğer kalan bir

senaryoda ise referans durum ile aynı değere ulaştığı görülmüştür. Ayrıca bu durumda gecikmeden kaynaklı yakıt tüketiminin 14 senaryoda referans duruma göre daha iyi bir değer yakaladığı saptanmıştır. Her iki amaç fonksiyonun birlikte en küçüklendiği durumda ise yakıt tüketiminde %15,2 oranında bir azalma meydana gelirken toplam gecikmenin %0,8 oranında arttığı görülmüştür. Gecikmeden kaynaklı yakıt tüketim değerleri referans duruma göre 28 senaryoda azalırken, gecikme süresi sadece 10 senaryoda iyileşmiştir. Bu durum zaten toplam gecikme sürelerinde farklı bir değişiklik yaşanmamasından kaynaklanmıştır. Bütün senaryoların çözüm süresi 10 saniyeyi geçmemektedir. Her bir senaryoda belirlenen çakışma sayıları Şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 2. Senaryolara göre toplam çakışma sayılarının dağılımı

Şekil 2’den de görüleceği üzere en fazla, ortalama ve en az çakışma sayısı sırasıyla 31, 20,3 ve 13 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda her bir senaryoda uçakların yaklaşık %20’sinin çakışmalardan kaçınmak için manevra yapması gerekmektedir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada uçak çakışma saptama ve çözümleme probleminin çözümü için karma tam sayılı doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Modelde toplam gecikme süresi ile gecikmeden kaynaklı yakıt tüketiminin ayrı ayrı ve birlikte en küçüklmesi amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçların kıyaslanması için bir referans durum belirlenmiştir ve bu durumda ilk gelene ilk hizmet verilir yaklaşımı ile çakışmalar çözümlenmiştir. Bu çalışmada çok sayıda uçak çeşidi kullanılmış olup hız ve yakıt tüketim değerlerinde olan farklılıklar amaç fonksiyonlarının arasındaki ilişkiyi daha iyi ortaya çıkarmaya yardımcı olmuştur. Deneysel sonuçlar incelendiği zaman, önerilen model toplam gecikme süresinde ve gecikmeden kaynaklı yakıt tüketiminde ayrı ayrı en küçüklendiği zaman referans duruma göre sırasıyla %3,2 ve %17,3 oranlarında iyileştirmeler meydana getirmiştir. Her iki amaç fonksiyonu birlikte en küçüklendiği durumda ise yakıt tüketiminde %15,2 azalma yapmasına karşın toplam gecikme sürelerinde %0,8 oranında bir artışa neden olmaktadır. Önerilen bu model ile farklı amaç fonksiyonlarının ilk gelen ilk hizmeti alır yaklaşımına göre çok daha verimli sonuçların elde edildiği gözlemlenmiştir. Sonuçlar incelendiği zaman hangi uçağın gecikme olarak vektör manevrası uygulaması kararının gecikmeden kaynaklı toplam yakıt tüketimini gözle görülür bir şekilde arttırabileceği anlaşılmaktadır. Ayrıca, uçaklar arasındaki çakışmaların önlenmesi için yapılan manevralarda sadece hava sahası gecikmelerinin göz önünde tutulması hava sahasında daha fazla yakıt tüketilmesine ve böylece de çevreyi daha fazla etkilemesine sebep olabilmektedir. Bunların yanında çakışma çözüm manevralarında uçak yakıt tüketim değerlerinin karar verme süreçlerine dâhil edilmesinin ekonomik önemi bir kez daha ortaya çıkmaktadır. Gecikme sürelerinin artması ise hava sahası kapasitesinin azalmasına ve kontrolörlerin uçakları daha uzun süre izlemesine ve dolayısıyla da iş yüklerinin artmasına neden olmaktadır. Ayrıca, artan gecikme süreleri uçakların varış zamanlarında da gecikmeler yaratmakta olup varış havalimanındaki kapı atama ve taksi rota planlamalarının değişmesine yol açacaktır. Bunlara ek olarak, uçuş sürelerinin artması kabin ekibinin uçuş sürelerinin erken dolmasına neden olarak kabin ekiplerinin çizelgelerinde değişiklikler yaşanmasına yol açacaktır. Bu durum ise havayolu işletmecilerine ekstra bir maliyet ortaya çıkaracaktır. Bütün bu muhtemel sonuçlar incelendiğinde ise her iki amaç fonksiyonunun birlikte ele alınarak tek bir amaç fonksiyonu haline dönüştürülmesi hem havayolu işletmecilerine oluşabilecek ek maliyetleri azaltılmalarında hem de hava sahası kapasitesinin verimli kullanılarak daha fazla sayıda uçuşun gerçekleştirilmesine imkân sağlayacaktır. Gelecek çalışmalarda bu modelin daha farklı hava sahalarında test edilmesi ve gerçek zamanlı benzetim çalışmaları ile kıyaslanması planlanmaktadır.

Referanslar

- Alonso-Ayuso, A., Escudero, L. F., & Martín-Campo, F. J. (2012). A mixed 0–1 nonlinear optimization model and algorithmic approach for the collision avoidance in ATM: Velocity changes through a time horizon. *Computers & Operations Research*, 39(12), 3136-3146.
- Alonso-Ayuso, A., Escudero, L. F., & Martín-Campo, F. J. (2016). Exact and approximate solving of the aircraft collision resolution problem via turn changes. *Transportation Science*, 50(1), 263-274.
- Alonso-Ayuso, A., Escudero, L. F., & Martín-Campo, F. J. (2016). An exact multi-objective mixed integer nonlinear optimization approach for aircraft conflict resolution. *Top*, 24(2), 381-408.
- Cafieri, S., & Durand, N. (2014). Aircraft deconfliction with speed regulation: new models from mixed-integer optimization. *Journal of Global Optimization*, 58(4), 613-629.
- Cafieri, S., & Omheni, R. (2017). Mixed-integer nonlinear programming for aircraft conflict avoidance by sequentially applying velocity and heading angle changes. *European journal of operational research*, 260(1), 283-290.
- Cafieri, S., & Rey, D. (2017). Maximizing the number of conflict-free aircraft using mixed-integer nonlinear programming. *Computers & Operations Research*, 80, 147-158.
- Cai, J., & Zhang, N. (2019). Mixed Integer Nonlinear Programming for Aircraft Conflict Avoidance by Applying Velocity and Altitude Changes. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(10), 8893-8903.
- Campo FJ. (2010). The collision avoidance problem: methods and algorithms. PhD Thesis, Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, Spain
- Carrier, J., Nace, D., Duong, V., & Nguyen, H. H. (2003). Using disjunctive scheduling for a new sequencing method in multiple-conflicts solving. In *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*, Vol (1), 708-714.
- Cecen, R. K., & Cetek, C. (2019). A Two-Step Approach for Airborne Delay Minimization Using Pretactical Conflict Resolution in Free-Route Airspace. *Journal of Advanced Transportation*, 2019.
- Cecen, R. K., & Cetek, C. (2020). Conflict-free en-route operations with horizontal resolution manoeuvres using a heuristic algorithm. *The Aeronautical Journal*, 124(1275), 767-785.
- Cecen, R. K., Saraç, T., & Cetek, C. (2020). Meta-heuristic algorithm for aircraft pre-tactical conflict resolution with altitude and heading angle change maneuvers. *TOP*, 1-19.
- Center, E. E. (2013). User manual for the base of aircraft data (BADA) revision 3.11. Brussels: Eurocontrol.
- Christodoulou, M., & Costoulakis, C. (2004). Nonlinear mixed integer programming for aircraft collision avoidance in free flight. In *Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, Vol (1), 327-330
- Hong, Y., Choi, B., Oh, G., Lee, K., & Kim, Y. (2017). Nonlinear conflict resolution and flow management using particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(12), 3378-3387.
- ICAO. Rules of the Air and Air Traffic Services, Air Traffic Management. 15th ed. (2007) Montreal, Canada: International Civil Aviation Organization Publications.
- Kuchar, J. K., & Yang, L. C. (2000). A review of conflict detection and resolution modelling methods. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, 1(4), 179-189.
- Pallottino, L., Feron, E. M., & Bicchi, A. (2002). Conflict resolution problems for air traffic management systems solved with mixed integer programming. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 3(1), 3-11.
- Richards, A., & How, J. P. (2002). Aircraft trajectory planning with collision avoidance using mixed integer linear programming. In *Proceedings of the 2002 American Control Conference*, (3), 1936-1941.
- Vela, A., Solak, S., Singhose, W. & Clarke, J.P. (2009). A mixed integer program for flight-level assignment and speed control for conflict resolution, In *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control*, 5219–5226



2007 ve 2019 Deprem Yönetmeliklerinde Betonarme Binalar İçin Yer Alan Farklı Deprem Kuvveti Hesaplama Yöntemlerinin Karşılaştırılmalı Olarak İrdelenmesi

Comparative Investigation of Different Earthquake Load Calculation Methods for Reinforced Concrete Buildings in the 2007 and 2019 Codes

Ceyhan Aksoylu^{1*}, Musa Hakan Arslan²

¹Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 42130 Konya, Türkiye

²Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 42130 Konya, Türkiye

Başyuru/Received: 21/12/2020

Kabul / Accepted: 05/02/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 05/02/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Bu çalışmada, 2019 yılında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2019) ile 2007 Türk Deprem Yönetmeliğinin (TDY-2007) deprem hesap yöntemleri açısından karşılaştırılmasına odaklanılmıştır. Bunun için aynı plan özelliklerine sahip 3-4-5 katlı çerçeve + perde türü betonarme binalar üzerinde ETABS programında lineer elastik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde TBDY-2019 için zemin sınıfı ZA, deprem tasarım sınıfı 1 (DTS1), TDY-2007’de ise zemin sınıfı Z1, deprem bölgesi 1. derece olacak şekilde İstanbul/Kartal bölgesi dikkate alınmıştır. Modellemeler sonucu binaların her iki yönü için Eşdeğer Deprem Yüğü yöntemi (EDY) ve Mod Birleştirme yöntemi (MBY) kullanılarak taban kesme kuvvetleri, periyot ve göreceli kat ötelenme değerleri hesaplanmıştır. Binaların her iki yöndeki EDY’den elde edilen taban kesme kuvvetleri x ve y yönü için sırasıyla %40-43 ve %39-47 oranında TBDY-2019’da daha az sonuç vermiştir. MBY’de ise bu oran sırasıyla %38-46 ve %35-45 şeklindedir. TBDY-2019 yönetmeliğindeki çatlamış kesit rijitliği kullanımı kat deplasmanlarının ve sistem periyodunun artmasına, taban kesme kuvvetlerinin ise azalmasına yol açmaktadır.

Anahtar Kelimeler

“Betonarme bina, ETABS modeli, Taban kesme kuvveti, TBDY-2019, TDY-2007”

Abstract

This study aims to compare the Turkish building seismic standards that come into force by the year 2019 (TBEC-2019) with Turkish Earthquake Code of 2007 (TEC-2007) according to earthquake calculation methods. For this purpose, linear elastic analyzes were carried out in the ETABS program on 3-4-5 story frame + shear wall type reinforced concrete buildings with the same plan features. For TBEC-2019, soil type is considered as ZA, seismic design class 1 (DTS1), in TEC-2007 soil class Z1, earthquake zone as 1st degree taken into account district of Kartal located in Istanbul. As a result of the modeling, base shear forces, period, and relative story drift calculated were made using the equivalent earthquake load method and mode combination method for both sides (X and Y) of the buildings. The base shear forces obtained from the equivalent earthquake load method in x and y directions of the buildings resulted in 40% -43% and 39-47% fewer results at TBEC-2019, respectively. In the mode combination method, this ratio is 38% -46% and 35-45%, respectively. This situation can be explained by the fact that the use of cracked section stiffness in the TBEC-2019 regulation, leads to an increase in story displacements and natural vibration period, and a decrease in base shear forces.

Key Words

“RC building, ETABS model, Base shear force, TBEC-2019, TEC-2007”

1. Giriş

Türkiye’deki fay hatlarının kırılması sonucu oluşan depremlerin yapılar üzerindeki yıkıcı etkisi kabul edilen bir gerçektir. Depremlerin yapılar üzerindeki bu olumsuz etkilerinin azaltılması amacıyla farklı yönetmelikler bilimin ışığında ve gelişen teknoloji ile yenilenerek yürürlüğe girmiştir. Ülkemizde 1940 yılında yürürlüğe giren "*Zelzele Mıntıklarında Yapılacak İnşaat Ait Yapı Talimatnamesi*" İtalyan yönetmeliğinden uyarlanmış bilinen ilk kaynak özelliği taşımaktadır Öztürk, Selekoğlu ve diğ. (2019). Depremden hasar gören yapıların varlığından bahsedilen ilk yapı yönetmeliği ise 1949 yılında "*Türkiye yer Sarsıntısı Bölgeleri Yapı Yönetmeliği*" olarak kabul edilmektedir Öztürk (2018). 1962 yılında ise ilk defa depremin yapılaraya verdiği zararın etkin bir şekilde ortaya konulduğu afet kavramı gündeme gelmiştir Alyamaç and Erdogan (2005). Bu tarihten sonra çıkarılan 1968, 1975 ve 1998 yılındaki yönetmeliklerde deprem konusu afet yönetmeliği ismi ile dile getirilmiştir. 2007 yılına gelindiğinde ise "*Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (TDY-2007)*" yürürlüğe girmiş, bu sayede mevcut betonarme binalarda lineer olmayan hesap yöntemi ve performans analizi kavramları yönetmeliğe eklenerek yeni bir bakış açısı kazandırılmıştır. 2007’den 2019’a kadar geçerli olan bu yönetmelik 1 Ocak 2019 itibarıyla yerini "*Türkiye Binaları Deprem Yönetmeliğine (TBDY-2019)*" bırakmıştır. Benzer şekilde Deprem Tehlike Haritası da yeni yönetmeliğe benzer olarak 18 Mart 2018 tarihli Resmi Gazete ’de yayınlanmış ve 1 Ocak 2019 tarihinde de yürürlüğe girmiştir Seyrek (2020).

Deprem mühendisliğinde meydana gelen değişmelere paralel olarak değişen yönetmeliklerde belirgin farklılıklar meydana gelmektedir. Türkiye’de yürürlükte olan yönetmeliklerde dünya literatüründe öncü olacak şekilde kapsamlı değişikliğe uğramaktadır. Özellikle TDY-2007 ve TBDY-2019 yönetmelikleri incelendiğinde belirgin farklılıkların olduğu görülmektedir. Deprem bölgesi kavramının ortadan kaldırılması, deprem tehlike haritasının değiştirilmesi ve AFAD’ın çalışmaları ile yeni interaktif web ortamından (<https://tdth.afad.gov.tr>) belirli tasarım parametrelerinin elde edilmesi daha gerçekçi bir tasarım adına önemli gelişmeler olarak sayılabilir. Bununla beraber yönetmelikte hesap yöntemlerinin özellikle şekil değiştirmeye göre olanlarda getirilen yenilikler, özel binalar için açılan yeni bölümler vs. gibi birçok değişiklik 2019 yönetmeliğinde vardır. TBDY-2019 yönetmeliği genel hatlarıyla incelendiğinde ASCE 7-16’nın içeriğine benzer çok sayıda değişikliğe gidildiğini göstermektedir Aksoylu ve Arslan (2019). Özellikle zeminlerin sınıflandırması çok daha detaylı bir şekilde yeni bir bölüm halinde sunulmaktadır. TDY-2007 yönetmeliğinde Z1 türü zeminler en iyi, Z4 türü zeminler ise en kötü zemini temsil edecek şekilde zemin sınıfları 4 gruba ayrılmışken TBDY-2019’da zemin sınıfları ve zemin grupları birleştirilerek (ZA’dan ZF’ye) tıpkı ASCE 7-16 yönetmeliğinde olduğu gibi A’dan F’ye doğru sıralanmaktadır (ASCE7-16 2017). Dolayısıyla TDY-2007’deki zemin sınıfları, TBDY-2019’a göre Z1(ZA, ZB), Z2(ZC), Z3(ZD) ve Z4(ZE)’ye karşılık gelmektedir. ZF sınıfı zemin için ise 2019 yönetmeliği sahaya özel zemin davranış analizinin uzmanlarla (yetkin mühendislerce) yapılmasını istemektedir.

Taslak formu 2016 yılında yayımlanan ve yürürlüğe 2019 yılında giren TBDY-2019 yönetmeliğine yönelik literatürde betonarme binalar için farklı analitik ve numerik çalışmalar sınırlı sayıda olsa da gerçekleştirilmiştir. Ayrıca TBDY-2019 ve TDY-2007 yönetmeliklerinin karşılaştırıldığı güncel çalışmalarda özellikle taban kesme kuvvetleri, bina deplasmanları, bina periyodları, ivme spektrum grafikleri araştırmacılar tarafından karşılaştırılmıştır. Literatür incelendiğinde TBDY-2019 yönetmeliğine yönelik son beş yılda yapılan çalışmaların çerçevesi, perdeli ve çerçeve+perdeli binalar üzerine olduğu görülmektedir. Bu çalışmalar, yapılan karşılaştırmalara göre Tablo 1’de detaylı olarak sunulmuştur. Tablo 1’de yayımlanan taslak yönetmelik dâhil son beş yılda TBDY-2019’a yönelik çalışmaların bazıları verilmiştir.

Tablo 1. TBDY-2019 yönetmeliği ile ilgili son dört yılda yapılan çalışmalar

Taşıyıcı sistem tipi	Yapılan karşılaştırmalar
Çerçevesiz Bina	TBDY-2019 yönetmeliği üzerine irdeleme Başaran (2018), Bikçe ve Bayrak (2018), Çavdar, Sunca et al. (2018), Erdem (2019), Kap, Özgan diğ. (2019), Mete (2019), Başaran ve Hiçyılmaz (2020), Bayrak, Bikçe ve diğ. (2020)
	TDY-2007 ve TBDY-2019 karşılaştırması Demir ve Kayhan (2017), Erdem ve Bikçe (2017), Keskin ve Bozdoğan (2018), Nemutlu ve Sarı (2018), Asığçel (2019), Balıkcı (2019), Dalyan ve Şahin (2019), Eldemir (2019), Nemutlu ve Sarı (2019), Öztürk, Selekoğlu ve (2019), Bozer (2020), Korkmaz (2020), Sümer ve Hamsici (2020)
Perdeli ve Perde + Çerçevesiz Bina	Yapı periyodunun araştırılması Aksoylu ve Arslan (2019), Börekçi (2019)
	TBDY-2019 yönetmeliği üzerine irdeleme Çavdar ve Yolcu (2018), Topçu (2019), Ünsal, Öncel diğ. (2020)
Perdeli ve Perde + Çerçevesiz Bina	TDY-2007, TBDY-2019 ve ASCE 7-16 karşılaştırması Tunç ve Tanfener (2007), Ulutaş (2019), Aksoylu, Mobark diğ. (2020)
	Yapı periyodunun araştırılması Aksoylu ve Arslan (2019), Güngör (2019) Perde konumunun değişiminin araştırılması Othman (2017), Yaman, Tekeli diğ. (2019), Bozer (2020), Isik ve diğ. (2020)

Bu çalışmada ise literatür ışığında farklı kat yüksekliğine sahip binalar, TDY-2007 ve TBDY-2019 deprem yönetmeliklerine göre ETABS v.18.1.1 yapı analiz programında numerik olarak karşılaştırılmıştır. Yapılan modellerin kolay yorumlanabilmesi için 3, 4 ve 5 katlı düzenli betonarme binaların analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada İstanbul/Kartal'da bulunan ZA (Z1) zemin sınıfında konut türü betonarme bina TBDY-2019 ve TDY-2007 yönetmeliklerine göre Eş Değer Deprem Yüğü (EDY) ve Mod Birleştirme Yöntemine (MBY) göre analiz edilmiştir. Analizler neticesinde her bir yapının periyodu, taban kesme kuvveti ve görelî kat ötelemesi karşılaştırılarak önerilerde bulunulmuştur.

2. TDY-2007 ve TBDY-2019'da Yer Alan Deprem Hesapları

Betonarme yapıların deprem hesapları doğrusal hesap yöntemleri ve doğrusal olmayan hesap yöntemleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. TBDY-2019'da var olan dayanıma göre tasarımın esasını oluşturan doğrusal hesap yöntemleri kendi içerisinde EDY, MBY ve Mod toplama yöntemi (MTY) olarak üçe ayrılmaktadır. Doğrusal olmayan hesap yöntemleri ise Tek modlu itme, çok modlu itme ve zaman tanım alanında hesap yöntemleridir. Bu çalışmada doğrusal hesap yöntemleri incelendiğinden sırasıyla EDY ve MBY yöntemlerine ait deprem hesap yöntemlerinden bahsedilmiştir.

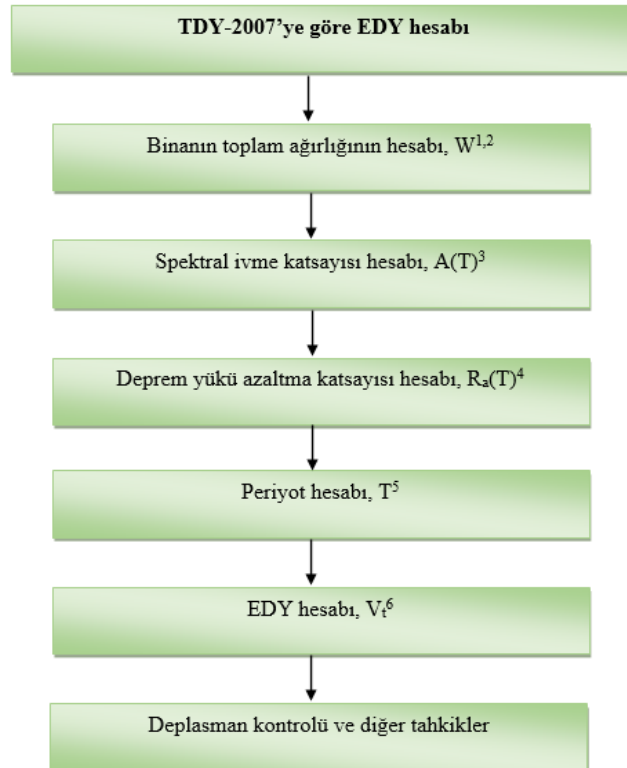
2.1. TDY-2007'ye göre EDY ve MBY Yöntemi

TDY-2007'de kat yükseklik sınırına bağılı olarak EDY yönteminin uygulanabileceği binalar için Tablo 2'deki sınırlamalara uyulması gerektiği belirtilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi deprem aktivitesi göreceli olarak daha fazla olan bölgelerde yaklaşık 7 kat ve üstündeki yapılarda EDY kullanılamamaktadır. Burada 1. Modu baz alarak hesap yapan EDY'nin artan kat sayısı ile beraber yerini önemli diğer modların devreye girdiği modal analize vermektedir.

Tablo 2. TDY-2007'ye göre EDY yönteminin uygulanabileceği binalar (TDY-2007)

Deprem Bölgesi	Bina Türü	Yükseklik Sınırı (m)
1,2	Her bir katta burulma düzensizliği katsayısının $\eta_{bi} \leq 2.0$ koşulunu sağladığı binalar	$H_N \leq 25$
1,2	Her katta burulma düzensizliği katsayısının $\eta_{bi} \leq 2.0$ koşulunu sağladığı ve ayrıca B2 türü düzensizliğin olmadığı binalar	$H_N \leq 40$
3,4	Tüm binalar	$H_N \leq 40$

Tablo 2'de verilen " η_{bi} " katsayısı burulma düzensizliği katsayısı ve " H_N " değeri ise temel seviyesinden itibaren toplam bina yüksekliğini ifade etmektedir. TDY-2007'ye göre EDY hesabı Şekil 1'de gösterilmiştir (TDY-2007). Şekil 1'deki hesap adımlarına ait ilgili denklemler sırasıyla Denklem 1, Denklem 2, Denklem 3, Denklem 4, Denklem 5 ve Denklem 6'da verilmiştir. Şekil 1'de verilen sembollerin yanındaki rakamlar Tablo 3'de verilen denklem numaralarına karşılık gelmektedir.



Şekil 1. TDY-2007'ye göre EDY hesabının şematik gösterimi

Tablo 3. TDY-2007'ye göre EDY hesap adımları

$$W = \sum_{i=1}^n w_i \quad w_i = g_i + n.q_i \quad (1)$$

$$W = \sum_{i=1}^n w_i \quad (2)$$

$$A(T) = A_0 * I * S(T) \quad (3)$$

$$R_a(T) = 1.5 + (R - 1.5) * \frac{T}{T_A} \quad 0 \leq T \leq T_A$$

$$R_a(T) = R \quad (4)$$

$$T_A \leq T$$

$$T = 2\pi * \sqrt{\frac{\sum_i^N m_i * d_{fi}^2}{\sum_i F_{fi} * d_{fi}}} \quad (5)$$

$$V_i = \frac{W * A(T)}{R_a(T)} \geq 0.1 * A_0 * I * W \quad (6)$$

Denklem 1'de verilen ve TDY-2007'de yer alan hareketli yük katılım katsayısı (n) binanın kullanım amacına bağlı olarak 0.8, 0.6 ve 0.3 değerlerini alabilmektedir. Bina içerisindeki her bir sabit ve hareketli yüklerin toplanması ile kat ağırlığı (w_i) hesaplanırken, tüm kat ağırlıkları toplanarak Denklem 2'de verilen toplam bina ağırlığı (W) elde edilmektedir. Denklem 3'de verilen spektral ivme katsayısı A(T), etkin yer ivme katsayısı (A_0), bina önem katsayısı (I) ve spektrum katsayısının S(T) çarpımı ile elde edilmektedir. Burada A_0 değeri, deprem bölgesine bağlı olarak sırasıyla 0.4, 0.3, 0.2 ve 0.1 değerlerini alabilmektedir. I değeri, binanın kullanım amacı veya türüne göre 1.5, 1.4, 1.2 ve 1.0 olarak seçilmektedir. S(T) değeri ise yerel zemin sınıfı ve doğal titreşim periyoduna (T) bağlı olarak hesap edildikten sonra Denklem 3'de dikkate alınmaktadır. Deprem sırasında binanın doğrusal elastik olmayan davranışını göz önüne almak için elastik deprem yükleri duruma göre Denklem 4'de verilen deprem yükü azaltma katsayısına $R_a(T)$ bölünmektedir. $R_a(T)$ ise, taşıyıcı sistem davranış katsayısına (R), binanın 1. mod doğal titreşim periyoduna ve zemin sınıfına bağlı olarak değerler alabilmektedir. EDY yöntemi uygulanırken deprem doğrultusundaki hâkim doğal titreşim periyodunun hesabı, Rayleigh&Ritz tarafından önerilen ancak literatürde Rayleigh metodu olarak bilinen ve Denklem 5'de verilen formüle göre yapılmaktadır. Burada m_i değeri, her katın kütesini, d_{fi} değeri, her katın fiktif deplasmanını ve F_{fi} değeri ise her kata gelen fiktif deprem yükünü temsil etmektedir. Denklem 6 kullanılarak ise EDY'nin (taban kesme kuvvetinin) hesabı yapılmaktadır. Son olarak yapının deplasman kontrolleri ve diğer tahkikleri incelenmektedir.

TDY-2007'de yapıların yeterli rijitliğe sahip olması için etkin görelî kat ötelemelerinin belirli bir sınırı aşmaması gerektiği belirtilmiştir. Buna göre her bir deprem doğrultusu için her katta bulunan kolon ve perdelerin etkin görelî kat ötelemelerinin (δ_i) en büyük değeri dikkate alınmaktadır. Görelî kat ötelemelerinin her bir kat için müsaade edilen en büyük değerinin belirlenmesi için Denklem 7 hesap edilmektedir (TDY-2007). Burada etkin kat öteleme değeri (δ_i), taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R) ile azaltılmış görelî kat ötelemesi (Δ_i) değerinin çarpımı sonucu Denklem 7'deki gibi hesap edilmektedir.

$$\Delta_i = d_i - d_{i-1}$$

$$\delta_i = R * \Delta_i \quad (7)$$

Görelî kat ötelemelerinin her bir kat için müsaade edilen en büyük değerinin belirlenmesi için Denklem 8 hesaplanmaktadır. Burada, kat yüksekliği h_i olarak ifade edilmektedir.

$$(\Delta_i)_{\max} \leq 0.02 * \frac{h_i}{R} \quad (8)$$

Bu denklemde elastik deplasmanın kullanılma sebebi Newmark'ın Newmark ve Hall (1982) eşit deplasman ilkesine göre depremin yer değiştirme talebinin yapının elastik davranması ile elde edilecek yer değiştirmeye eşit olacağı ilkesine dayanmaktadır. EDY yönteminin uygulandığı ve uygulanmadığı yapılar için kullanılabilen MBY yönteminde, maksimum iç kuvvetler ve deplasmanlar, binada yeterli sayıda doğal titreşim modunun her biri için hesaplanan maksimum katkıların istatistiksel olarak birleştirilmesi ile elde edilmektedir Mahmoud (2018). EDY yönteminde yapının 1. Mod değerine karşılık gelen periyot değeri dikkate alınırken, MBY'de binada yeterli sayıda doğal titreşim modu dikkate alınmaktadır. MBY'de dikkate alınan azaltılmış ivme spektrum değeri $S_{ar}(T_n)$, herhangi bir n'inci titreşim modu göz önüne alınarak Denklem 9'daki gibi hesap edilmektedir.

$$S_{aR}(T_n) = \frac{S_{ae}(T_n)}{R_a(T_n)} \quad (9)$$

MBY’de, EDY’de olduğu gibi bina içerisinde yer alan döşemelerin yatay düzlemde rijit diyafram olarak çalıştığı düzenli binalarda, her bir katta birbirine dik doğrultuda iki yatay serbestlik derecesi ile kütle merkezinden geçen düşey eksen etrafında dönme serbestlik derecesi olmak üzere toplam üç serbestlik derecesi göz önüne alınmaktadır Mahmoud (2018). Dolayısıyla her katta modal deprem yükleri bu serbestlik dereceleri için hesap edilmektedir. Ayrıca hesaba katılacak titreşim mod sayısı, birbirine dik x ve y yatay deprem doğrultularının her birinde her bir mod için hesaplanan etkin kütlelerin toplamının hiçbir zaman bina toplam kütlelerinin %90’ından daha az olmama kuralına göre Denklem 10’daki gibi belirlenmektedir (TDY-2007).

$$\sum_{n=1}^Y M_{x_n} = \sum_{n=1}^Y \frac{L_{x_n}^2}{M_n} \geq 0.90 * \sum_{i=1}^N m_i$$

$$\sum_{n=1}^Y M_{y_n} = \sum_{n=1}^Y \frac{L_{y_n}^2}{M_n} \geq 0.90 * \sum_{i=1}^N m_i \quad (10)$$

Denklem 10’da yer alan L_{x_n} ve L_{y_n} ile modal kütle M_n ’nin ifadeleri, kat döşemelerinin rijit diyafram olarak çalıştığı binalar için Denklem 11’deki gibi hesaplanmaktadır.

$$L_{x_n} = \sum_{i=1}^N m_i * \Phi_{x_{in}}; L_{y_n} = \sum_{i=1}^N m_i * \Phi_{y_{in}}$$

$$M_n = \sum_{i=1}^N (m_i * \Phi_{x_{in}}^2 + m_i * \Phi_{y_{in}}^2 + m_{\theta i} * \Phi_{\theta_{in}}^2) \quad (11)$$

Göz önüne alınan deprem doğrultusu için ilk olarak MBY’den elde edilen V_{TB} (taban kesme kuvveti) değerinin, EDY ile elde edilen V_t (taban kesme kuvveti)’ne olan oranı bulunur. Daha sonra bu oran β kat sayısı ile çarpılır. Denklem 12’de verilen B_B değeri, mod katkılarının birleştirilmesi ile bulunan herhangi bir büyüklüğü, B_D ise B_B büyüklüğüne ait artırılmış ilgili değeri göstermektedir. Hesaplama sonucu bulunan değer Denklem 12’de verilen β değerinden küçük ise, MBY yöntemi ile bulunan tüm iç kuvvetler ve yer değiştirme değerleri Denklem 12’den elde edilen kat sayı ile artırılır. Binada A1, B2 ve B3 türü düzensizliklerden en az birinin bulunması durumunda $\beta=0.90$ olarak dikkate alınırken, düzensizliklerin bulunmaması durumunda ise yapı ödüllendirilerek $\beta=0.80$ alınmaktadır (TDY-2007).

$$B_D = \frac{\beta * V_t}{V_{TB}} B_B \quad (12)$$

2.2. TBDY-2019’a göre EDY ve MBY Yöntemi

TBDY-2019 yönetmeliği daha önceki yönetmeliklere göre oldukça kapsamlı yenilikler ile yürürlüğe girmiştir. Özellikle yeni bir tanımlama ile deprem tasarım sınıfları (DTS) kavramı, deprem bölgesi tanımını ortadan kaldırmıştır. DTS’ler, kısa periyod tasarım spektral ivme katsayısı (S_{DS}) ve bina yükseklik sınıfına (BKS) bağlı olarak belirlenmektedir. Buna göre binaların DTS değerleri, Türkiye Sismik Tehlike Haritalarının bulunduğu web ortamından ilgili yer için hesaplanan S_{DS} değerlerine ve bina önem katsayısına göre en yüksek dereceden en düşük dereceye doğru 1, 2, 3 ve 4 değerlerinden birini almaktadır. Bunun yanı sıra yapının bina kullanım sınıfı (BKS) durumuna göre 1a, 2a, 3a ve 4a olma durumu da mevcuttur. Bunun anlamı 1 ve 1a sınıfı en kritik tasarım kurallarını içerirken, 4 ve 4a’ya doğru gidildikçe deprem tasarım kriterlerinde daha esnek davranabilme durumunun meydana gelmesidir. DTS’ler, TDY-2007’deki deprem bölgelerine benzetilebilir. Ancak TDY-2007’den farklı olarak yeni yönetmelikle beraber toplam 8 adet deprem tasarım sınıfı tanımlanmıştır. Bir diğer önemli değişiklik ise BYS (Bina Yükseklik Sınıfı)’dir. BYS, binanın toplam yüksekliğine (H_N) ve DTS’ye bağlı olarak BYS1’den BYS8’e kadar değerler almaktadır. Bu sınıflandırmada BYS1 en yüksek, BYS8 ise en düşük yükseklikteki yapıları temsil etmektedir. Ancak yine TBDY-2019 ile yüksek yapıların tasarımına yönelik özel bir bölüm (TBDY-2019-13. Bölüm) açılmış olup en yüksek bina sınıfını temsil eden BYS1’e giren binaların tasarımı temel hesaplara göre değil, yüksek binaların tasarım kurallarını içeren ilgili bölüme göre yapılacağı belirtilmiştir.

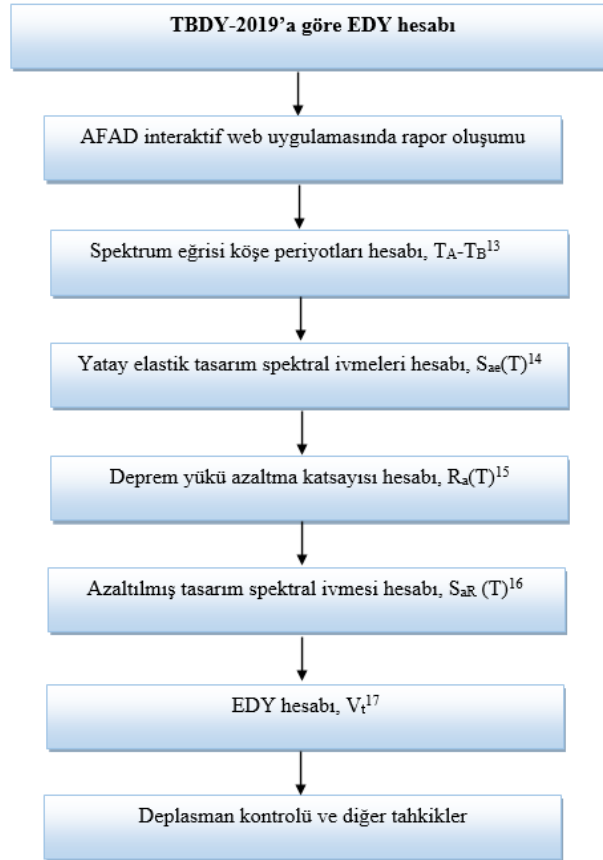
TBDY-2019’da göze çarpan en önemli değişikliklerden biri de TDY-2007’de de var olan taşıyıcı sistem davranış katsayısının (R) yanı sıra dayanım fazlalığı katsayısının (D) da kullanılmasıdır. TBDY-2019 ile dayanıma göre tasarım (DGT) kavramı gündeme gelmiş olup, dayanım fazlalığı da R katsayısına benzer şekilde yapı özellikleri dikkate alınarak belirlenmektedir. Bunun amacı gevrek özellik gösteren kesme hasarının önlenmesi için kolon, perde ve giriş gibi yapı elemanlarının kesme hesabında deprem kuvvetinden dolayı elemana gelen kesme kuvveti kesit tesirinin D katsayısı ile artırılarak, yapının her koşulda eğilme hasarına uğramasını sağlamak ve böylece kapasite tasarımının bir halkasını gerçekleştirmektir. D katsayısının uygulanacağı elemanlar her bir yapı sistemi için 1.5 ile 3.5 arasında değişen değerleri ile TBDY-2019’da verilmiştir. Arslan ve Erkan’ın (2011) yaptıkları çalışmada TDY-2007’ye göre tasarlanan betonarme binalarda global performansı düşünülerek bulunan dayanım fazlalığının 2~2.5 arasında olduğu tespit edilmiştir.

TBDY-2019 ile dayanıma göre tasarım dikkate alınarak yapılan bina tasarımlarında etkin kesit rijitliklerinin de dikkate alınması zorunluluğu getirilmiştir. Bu durumda kolon, kiriş, perde ve döşeme elemanlarının tasarımında eğilme rijitliği (EI) değerleri sırasıyla başlangıç rijitliğinin %70, %35, %50 ve %25'i kadar olduğu kabul edilerek tasarımın yapılması gerektiği belirtilmiştir. Kolon üzerinde bulunan yüksek normal kuvvet seviyelerinden dolayı (ki çoğu zaman $(N_d/(A_{c,x} f_{ck}) > 0.1)$ seviyesinin üzerindedir) çatlamanın daha geç olması kolonlardaki katsayının daha yüksek olmasının bir sebebidir. Betonarme yapıların tasarım yönetmeliği olan TS-500-2000 (TS500-2000)'de de bunun bir yansıması narinlik hesaplarında bulunmaktadır. Narinlik hesaplarında kirişlerin ataletleri %50 azaltılmakta kolonların ataletleri ise değiştirilmemektedir. Dolayısıyla deprem ya da narinlik problemleri gibi stabilite sorunlarına neden olacak hesaplarda yüksek deplasman istemleri için yapıyı oluşturacak olan elemanların rijitlikleri daha düşük varsayılmaktadır. TBDY-2019'da BYS sınırına bağlı olarak EDY yönteminin uygulanabileceği binalar için Tablo 4'deki sınırlamalara uyulması gerektiği belirtilmiştir.

Tablo 4. TBDY-2019'a göre EDY yönteminin uygulanabileceği binalar (TBDY 2019)

Bina türü	İzin verilen bina yükseklik sınıfı	
	DTS=1, 1a, 2, 2a	DTS=3, 3a, 4, 4a
Her bir katta burulma düzensizliği katsayısının $\eta_{bi} \leq 2.0$ koşulunu sağladığı ve ayrıca B2 türü düzensizliğinin olmadığı binalar	BYS ≥ 4	BYS ≥ 5
Diğer tüm binalar	BYS ≥ 5	BYS ≥ 6

TBDY-2019 yönetmeliği deprem tasarımında ASCE 7-16 (2017) yönetmeliği ile TDY-2007 yönetmeliği arasında kalan bir yönetmelik olarak hazırlandığı anlaşılmaktadır. TBDY-2019'da yapının ağırlığının hesaplanması ve rayleigh periyot formülünün hesabı TDY-2007'de olduğu gibidir. TBDY-2019'da verilen EDY'ye ait hesap aşamaları Şekil 2'deki gibi özetlenebilir:



Şekil 2. TBDY-2019'da verilen EDY hesabının şematik gösterimi

Şekil 2'deki hesap adımlarına ait ilgili denklemler sırasıyla Tablo 5'de Denklem 13, Denklem 14, Denklem 15, Denklem 16, Denklem 17 ve Denklem 18 olarak verilmiştir. Şekil 2'de verilen sembollerin yanındaki rakamlar Tablo 5'de verilen denklem numaralarına karşılık gelmektedir.

Tablo 5. TBDY-2019'a göre EDY hesap adımları

$T_A = \frac{0.2 * S_{D1}}{S_{DS}}, \quad T_B = \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$	(13)
$S_{ae}(T) = (0.4 + 0.6 * \frac{T}{T_A}) * S_{DS}$	$0 \leq T \leq T_A$
$S_{ae}(T) = S_{DS}$	$T_A \leq T \leq T_B$
$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1}}{T}$	$T_B \leq T \leq T_L$
$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1} * T_L}{T^2}$	$T_L \leq T$
$R_a(T) = \frac{R}{I}$	$T > T_B$
$R_a(T) = D + (\frac{R}{I} - D) * \frac{T}{T_B}$	$T \leq T_B$
$S_{aR}(T) = \frac{S_{ae}(T)}{R_a(T)}$	(16)
$V_{\text{ie}}^x = m_t * S_{aR}(T_p^x) \geq 0.04 * m_t * I * S_{DS} * g$	(17)

Yapı tasarımında deprem güvenliğinin ve yeterli rijitliğin sağlanması amacıyla hemen her deprem yönetmeliğinde her kattaki kolon ve perdelerin görel kat öteleme değerlerine üst sınır getirilmiştir. TBDY-2019 ile de binalarda dolgu duvarın çerçeve elemana bitişik veya ayrı olmasına bağlı olarak yeni bir görel kat öteleme formülasyonu getirilmiştir. Bununla beraber TDY-2007'de etkin görel kat öteleme, h_i ve R 'ye bağlıyken, TBDY-2019'da bunlara ilaveten bina önem katsayısı (I) parametre olarak dikkate alınmaktadır. TBDY-2019'da etkin görel kat ötelemesinin belirlenmesinde dolgu duvarın çerçeveye bitişik imal edilmesi durumunda Denklem 18, çerçeve ile duvarlar arasında yalıtım bulunması durumunda ise Denklem 19 dikkate alınmaktadır.

$$\lambda * \frac{\delta_{i,\max}^x}{h_i} \leq 0.008 * \kappa \quad (18)$$

$$\lambda * \frac{\delta_{i,\max}^x}{h_i} \leq 0.016 * \kappa \quad (19)$$

Denklemlerde verilen kat yüksekliği " h_i ", x doğrultusunda binanın i 'nci katının etkin görel kat ötelemelerinin kat içindeki en büyük değeri, " $\delta_{i,\max}^x$ ", DD3 depremine göre hesaplanan elastik tasarım spektral ivmesinin $S_{ae}(T)_{DD3}$, DD2 depremine göre hesaplanan elastik tasarım spektral ivmesine $S_{ae}(T)_{DD2}$ oranı λ , Denklem 20'deki gibi hesap edilmektedir. Burada yönetmelik DD-3 ve DD-2 deprem düzeylerini karşılaştırarak dolgu duvarların devreye girdiği ve çatladığı deprem düzeyi için formülasyonda bir iyileştirme yapmıştır. Ayrıca Denklem 18 ve Denklem 19'da yer alan " κ " katsayısı betonarme binalarda $\kappa=1$, daha narin olan çelik binalarda ise $\kappa=0.5$ alınacağı belirtilmiştir. Bu çalışmada betonarme binalar dikkate alındığından $\kappa=1$ olarak dikkate alınmıştır (TBDY-2019).

$$\lambda = \frac{S_{ae}(T)_{DD3}}{S_{ae}(T)_{DD2}} \quad (20)$$

Etkin görel kat ötelemelerinin azaltılmış deprem yüklerine göre belirlenen görel kat ötelemelerine (Δ_i^x) göre hesabı Denklem 21'de verilmiştir.

$$\delta_{i,\max}^x = \frac{R}{I} * \Delta_i^x \quad (21)$$

Buna göre izin verilen maksimum azaltılmış görel kat öteleme, dolgu duvarın bitişik ve yalıtımlı olması durumu için Denklem 22 ve Denklem 23'de sırasıyla verilmiştir.

$$\Delta_i^x \leq \frac{0.008 * h_i * I}{R * \lambda} \quad (22)$$

$$\Delta_i^x \leq \frac{0.016 * h_i * I}{R * \lambda} \quad (23)$$

TDY-2007'deki MBY hesabında x ve y yönü için her bir modda hesaplanan etkin kütlelerin toplamının hiçbir zaman bina toplam kütlelerinin %90'ından daha az olmaması koşulu ifade edilmekteydi. Ancak TBDY-2019'da bu oran %95'e çıkarılmıştır. Ayrıca, en az %3 katkısı olan bütün modların göz önüne alınması gerektiği belirtilmektedir. Burada TBDY-2019 ile beraber kütle katılımının artması ile modal analizlerde hesaplanan kesme kuvvetlerinin bir miktar artmasını beklemek doğaldır.

3. Numerik Modelleme Çalışmaları

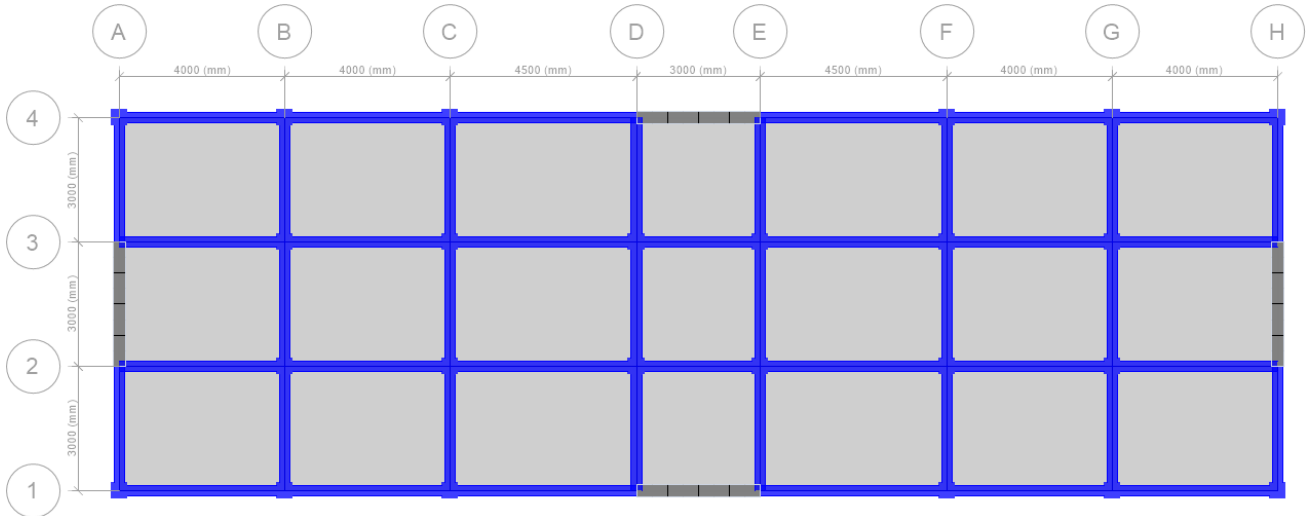
İstanbul/Kartal'da yapılması planlanan 3, 4 ve 5 katlı çerçeve + perde tipi betonarme konut binası yeni (TBDY-2019) ve eski (TDY-2007) deprem yönetmeliklerine göre incelenmiştir. Doğrusal analiz yöntemi olan EDY ve MBY yöntemine göre numerik modellerin analizleri yapılarak karşılaştırılmıştır. Toplam bina yükseklikleri seçilirken TDY-2007 ve TBDY-2019 için EDY yönteminin uygulanabileceği yükseklik sınırları göz önüne alınmıştır. ETABS v.18.1.1 yapı analiz programında tasarlanan modelde her bir kat yüksekliği 3.5 metre seçilmiştir. Plan geometrisi aynı olan yapıların kat alanı 252 m²'dir. Yapıda bulunan perde alanı/toplam kat alanı x ve y yönü için %0.158, %0.119 ve %0.0952 mertebesindedir.

Modellenen binalar TDY-2007 yönetmeliğine göre 1. derece deprem bölgesinde yer almaktadır. TBDY-2019'da deprem bölgesi tanımı kaldırıldığından burada ilgili bölge için AFAD'ın interaktif web uygulaması kullanılarak elde edilen sonuç raporundan alınan etkin yer ivmesine göre hesaplar yapılmıştır. TDY-2007'deki zemin sınıfları, TBDY-2019'a göre Z1(ZA)'ya karşılık gelmektedir.

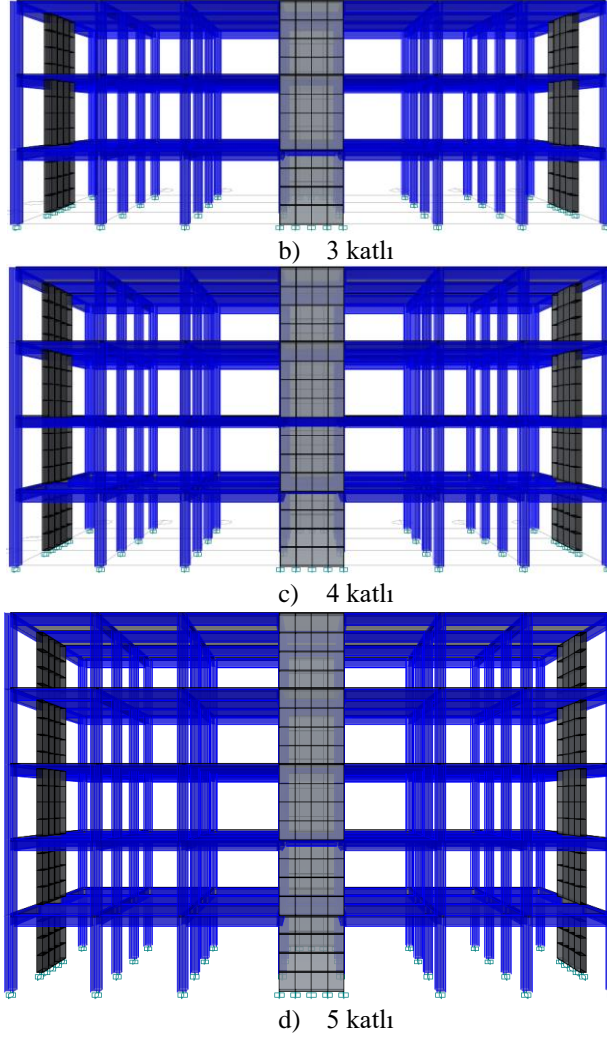
TBDY-2019'a göre hesaplarda taşıyıcı sistemde kullanılan kesitler ve çatlama kesit rijitlik çarpanları Tablo 6'da verilmiştir. Kolon ve kiriş kesitleri 3, 4 ve 5 katlı her bir yapının her katında sabit ve aynı seçilmiştir. Seçilen düşey taşıyıcı elemanlar TS500'e göre artırılmış (1.4G+1.6Q) yükler altında yeterli en kesit boyutlarına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Binaların temelleri için ayrı bir kesit boyutu tanımlanmamış ve doğrudan ankastre mesnet olarak modellenmiştir. Planda yapı geometrisi aynı olan binalarda C25 sınıfı beton kullanılmıştır. Binanın taşıyıcı sistemi, deprem yüklerinin süneklik düzeyi yüksek betonarme çerçeve + perdeler ile birlikte taşındığı sistem olarak dikkate alınmış olup taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R=7), dayanım fazlalığı katsayısı ise D=2.5 olarak dikkate alınmıştır. Kat planında düzensizliklerin olmaması için düzenli bir taşıyıcı eleman yerleşimi yapılmıştır (Şekil 3).

Tablo 6. Yapı elemanlarının boyutları

Kesit	Ebat	Çatlama kesit rijitlik çarpanı
Kolon	300x300 mm	0.70
Perde	250x3000 mm	0.50
Kiriş	250x500 mm	0.35
Döşeme	120 mm	0.25



a) Kat planı



Şekil 3. ETABS yapı modeli kat planı ve 3D görünümü

Tasarımı yapılan binada yapı ağırlığına ilave olarak kaplama yükü+duvar yükü de döşemeye ilave edilerek $g=3.5\text{kN/m}^2$, hareketli yük $q=2\text{kN/m}^2$, kar yükü İstanbul/Kartal için son katta $q_k=0.75\text{kN/m}^2$ olarak dikkate alınmıştır. Yapılan analizlerde dolgu duvarın çerçeveye bitişik olmadığı varsayımı yapılarak yalnızca zati ağırlık olarak hesaplara katılmıştır. Modellenen binaların her biri için TDY-2007 ve TBDY-2019’da dikkate alınan tasarım parametreleri, Tablo 7, Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 7. Hesap parametreleri

İstanbul (Kartal)					
Enlem/Boylam: $40.904306^\circ / 29.211872^\circ$					
Yönetmelik	Zemin Tipi	S_{DS}	S_{D1}	T_A	T_B
TBDY-2019	ZA (sağlam sert kaya)	0.83	0.229	0.055	0.276
TDY-2007	Z1 (sağlam sert kaya)	A_0 0.4		T_A 0.1	T_B 0.3

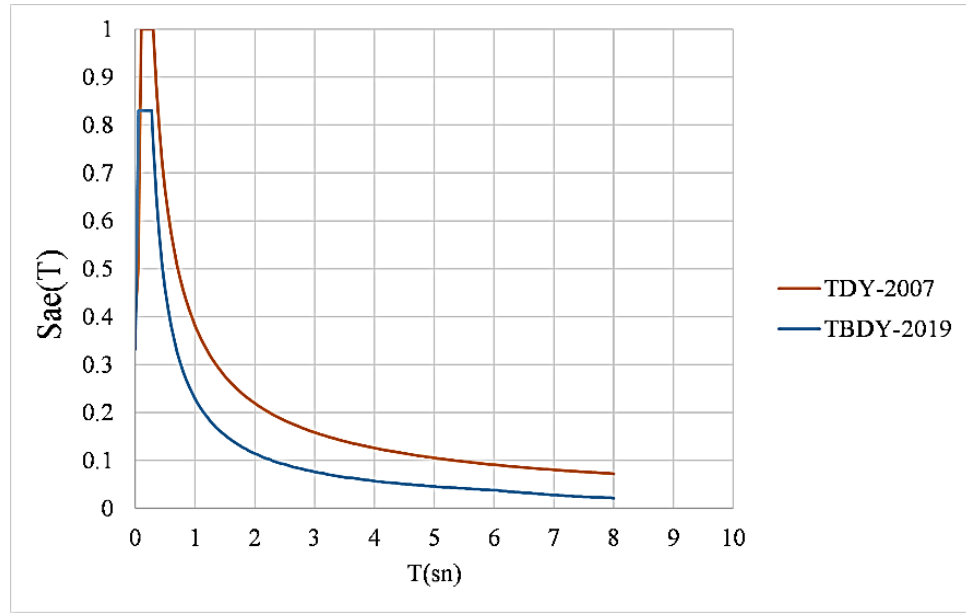
Tablo 8. TBDY-2019 ve TDY-2007 hesap parametreleri

TBDY-2019 Hesap parametreleri	
Deprem yer hareketi	DD-2 (50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareket düzey)
Deprem tasarım sınıfı	DTS1 BYS6 ($H_N=10.5\text{m}$) BYS7 ($H_N=14\text{m}$)
BYS	BYS7 ($H_N=17.5\text{m}$)

Tablo 8 (devam). TBDY-2019 ve TDY-2007 hesap parametreleri

TBDY-2019 Hesap parametreleri	
Bina önem katsayısı	I=1
BKS	BKS3
PGA	0.427g
TDY-2007 Hesap parametreleri	
Deprem yer hareketi	DD-2 (50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareket düzey
Kat Yüksekliği	3 katlı: $H_N=10.5m$ 5 katlı: $H_N=14m$ 7 katlı: $H_N=17.5m$
Bina Önem Katsayısı	I=1
PGA	0.4g

İstanbul/Kartal ilçesinin spektral ivme değerleri ve zemin hâkim periyotları TDY-2007 ve TBDY-2019'a göre belirlenmiştir. TDY-2007'ye göre Kartal ilçesi 1. derece deprem bölgesinde yer aldığından ilgili yer için dikkate alınan etkin yer ivme katsayısı (0.4) ile spektrum katsayısı ($S(T)=2.5$) çarpılarak ölçeklendirilmiştir. TBDY-2019 için ise Kartal ilçesine ait merkez koordinatlar dikkate alınarak AFAD kurumunun interaktif web uygulamasında yer alan deprem ivme haritaları kullanılmıştır. Her iki deprem yönetmeliğine göre ilgili bölgenin tasarım spektrum eğrisi DD2 deprem yer hareket düzeyi ve Z1(ZA) için Şekil 4'de gösterilmiştir.

**Şekil 4.** Kartal ilçesinin TDY-2007, TBDY-2019 için birleştirilmiş tasarım spektrum eğrileri

Farklı kat sayısına sahip (3, 4 ve 5 katlı) betonarme çerçeve + perdeli yapıdan oluşan konut binaları deprem tasarım parametreleri ve zemin tipine Z1(ZA)'ya göre TDY-2007 ve TBDY-2019'a göre karşılaştırılmıştır. Yapılan tüm karşılaştırmalar şekil ve tablolar halinde sunulmuştur. Tablo 9'da TDY-2007 ve TBDY-2019'a göre R katsayısı kontrolü yapılarak sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 9. Yapı Davranış Katsayısı (R) İle İlgili Kontrol

Kat Sayısı ve Yönü	TDY-2007	TBDY-2019
	Kesme kuvvetine göre bir kontrol yapılır ve gerekirse* R değiştirilir.	Devrilme momentine göre bir kontrol yapılır ve gerekirse** R değiştirilir.
3-X	6.69	
3-Y	6.67	İlgili şart yönetmelik sınırları içinde sağlandığı için R ile ilgili bir değişiklik yapılmamıştır.
4-X	6.73	
4-Y	6.71	
5-X	6.75	
5-Y	6.74	

*: 2007 deprem yönetmeliğinde deprem etkin yönde perdelerin taban kesme kuvvetlerine oranla aldıkları pay (α_s) 0.75'in üzerinde ise 7 olarak seçilmiş yapı davranış katsayısının ($10-4\alpha_s$) olarak değiştirilmesi gerektiği,

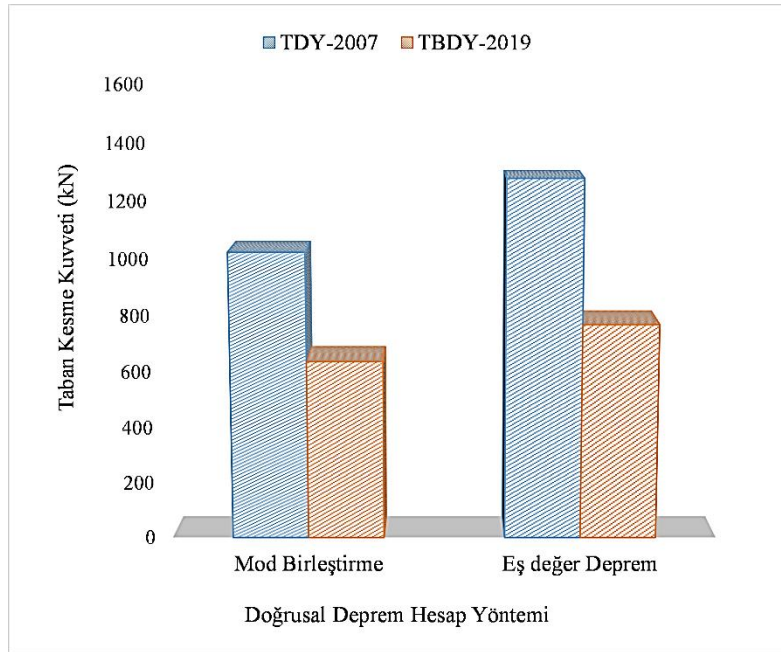
** : 2019 deprem yönetmeliğinde deprem etkin yönde perdelerin herhangi birinde perde tabanında meydana gelen devrilme momenti ile binanın tabanında yatay yükler altında meydana gelen toplam devrilme momenti oranı 0.30'in üzerinde ise ($M_{pDEV}/M_o > 0.30$) 7 olarak seçilmiş yapı davranış katsayısının %80'inin dikkate alınması gerektiği söylenmektedir.

Tablo 10'da her iki yönetmeliğe göre elde edilen her bir yapının hâkim doğal titreşim periyodu ve bina ağırlıkları verilmiştir. Her iki yönetmelik içinde kat ağırlığının artışı yapının 1. mod periyot değerlerinin artmasına yol açmıştır.

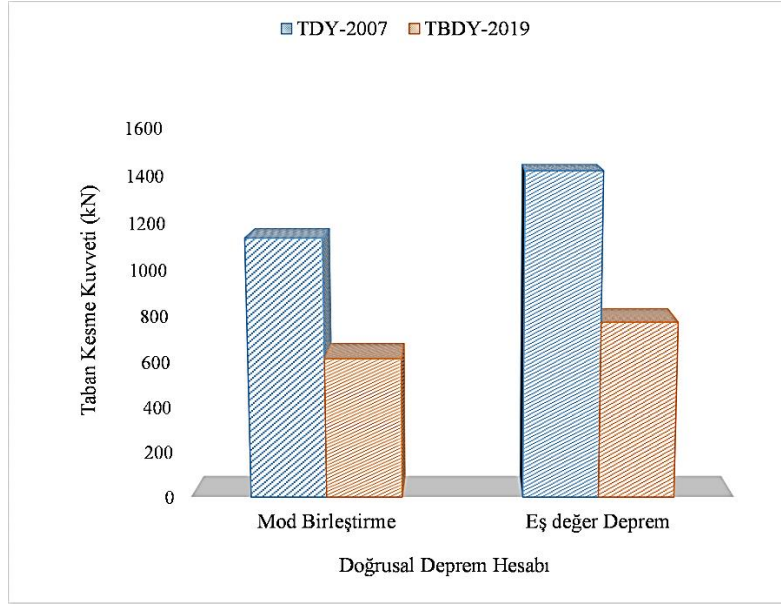
Tablo 10. TDY-2007 ve TBDY-2019'a göre periyot karşılaştırması

Kat Sayısı	Bina Ağırlığı W=g+nq (kN)	Deprem Yönü	Doğal Titreşim Periyodu (sn)		TBDY-2019/TDY-2007 (X/Y)
			TDY-2007 Z1(X/Y)	TBDY-2019 ZA(X/Y)	
3 (10.5 m)	9120	X/Y	0.265/0.257	0.381/0.367	1.44/1.43
4 (14 m)	12260	X/Y	0.380/0.368	0.549/0.526	1.44/1.43
5 (17.5 m)	15400	X/Y	0.499/0.485	0.725/0.694	1.45/1.43

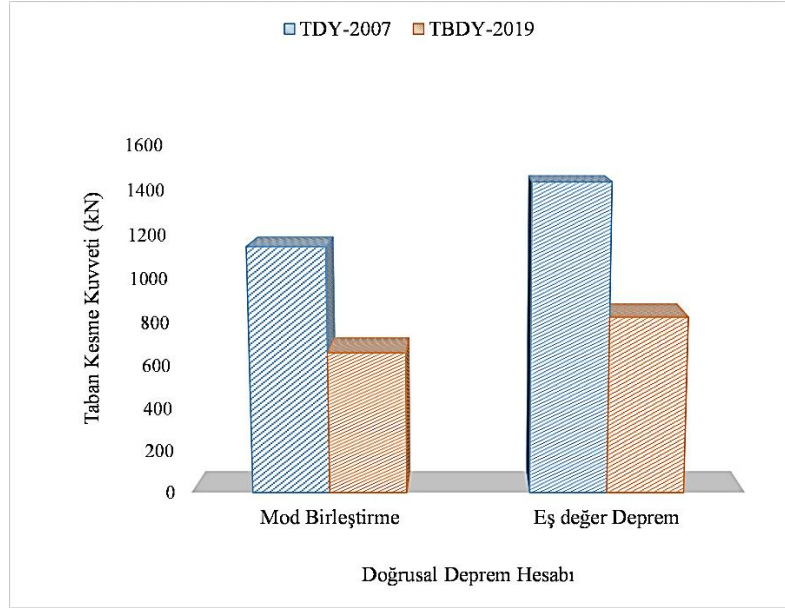
Tablo 10'de görüldüğü üzere, TBDY-2019'da etkin kesit rijitlik çarpanlarının hesaba dâhil edilmesinden dolayı bina periyodunun TDY-2007'ye göre %45 mertebesinde arttığı görülmektedir. Ayrıca TDY-2007'de spektrum eğrisi köşe periyotları deprem bölgesine bağlı olarak sabit değerler alırken, TBDY-2019 yönetmeliği ile hem zemin sınıfına hem de yapının bulunduğu bölgedeki spektral ivme katsayısına göre belirlenmektedir. Her bir konut binasının x yönü dikkate alınarak EDY ve MBY yöntemlerine göre karşılaştırılan modellerin taban kesme kuvveti sonuçları Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7'de, x ve y yönü için numerik sonuçlar ise Tablo 11'de verilmiştir. Her iki deprem yönü için MBY/EDY oranı hesaplanarak düzenli binalar için olması önerilen 0.8 katsayısı ile kıyas edilmiştir.



Şekil 5. 3 katlı konut binasının x yönü taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması



Şekil 6. 4 katlı konut binasının x yönü taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması



Şekil 7. 5 katlı konut binasının x yönü taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması

Tablo 11. TDY-2007 ve TBDY-2019'a göre bina analiz sonuçları

Yönetmelik	Taban Kesme Kuvvetleri (kN)-3 katlı bina						Sınır değer MBY/EDY*
	MBY		EDY		MBY/EDY		
	V_{EX}	V_{EY}	V_{EX}	V_{EY}	V_{EX}	V_{EY}	
TDY-2007	997	994	1246	1243	0.80	0.80	> 0.80
TBDY-2019	650	679	784	813	0.82	0.83	> 0.80

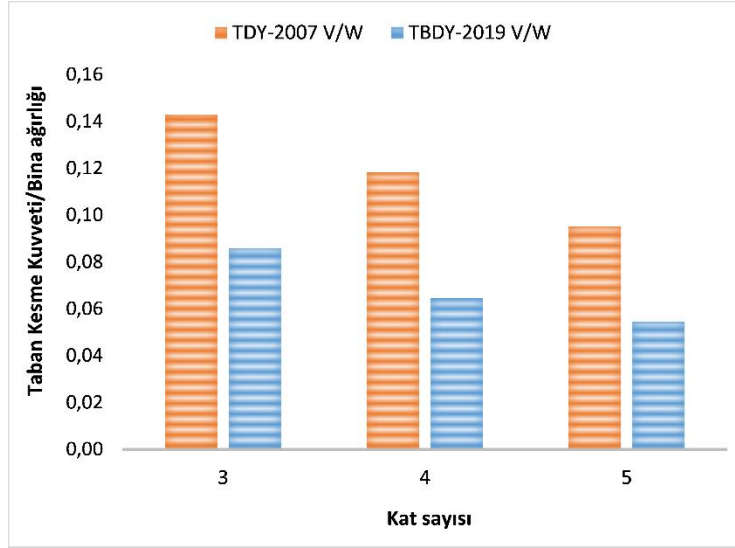
Yönetmelik	Taban Kesme Kuvvetleri (kN)-4 katlı bina						Sınır değer MBY/EDY
	MBY		EDY		MBY/EDY		
	V_{EX}	V_{EY}	V_{EX}	V_{EY}	V_{EX}	V_{EY}	
TDY-2007	1115	1145	1394	1427	0.80	0.80	> 0.80
TBDY-2019	629	655	791	791	0.80	0.83	> 0.80

Tablo 11 (devam). TDY-2007 ve TBDY-2019'a göre bina analiz sonuçları

Taban Kesme Kuvvetleri (kN)-5 katlı bina							
Yönetmelik	MBY		EDY		MBY/EDY		Sınır değer MBY/EDY
	V _{EX}	V _{EY}	V _{EX}	V _{EY}	V _{EX}	V _{EY}	
TDY-2007	1128	1154	1413	1442	0.80	0.80	> 0.80
TBDY-2019	672	672	840	840	0.8	0.8	> 0.80

* MBY/EDY oranı düzenli yapılar için yönetmelikler gereği minimum 0.8 olmalıdır.

Her iki yönetmeliğe göre de yapının ağırlığının artması taban kesme kuvvetlerinin artışına yol açmıştır (Şekil 8). Ancak TBDY-2019'dan elde edilen taban kesme kuvveti değerleri TDY-2007'ye göre daha az elde edilmiştir. Bu durum TBDY-2019'da son katta dikkate alınan ilave kar yükünün bina ağırlığını artırması ve çatlamış kesit rijitliklerinin dikkate alınması ile taban kesme kuvvetinin azalmasından kaynaklanmaktadır.

**Şekil 8.** TDY-2007 ve TBDY-2019'a göre taban kesme kuvvetinin bina ağırlığına göre değişimi

Betonarme konut yapılarının her birinin yeterli rijitliğe sahip olup olmadıklarının anlaşılması için her iki yönetmeliğe göre x ve y yönünde görel kat öteleme kontrolü yapılmış Tablo 13'de yalnızca x yönündeki sonuçlar Ex yüklemesi altında hesaplanarak verilmiştir. Yapılan kontroller neticesinde her iki yönetmelik içinde seçilen boyutların rijitlik açısından yeterli olduğu görülmüştür.

Tablo 12. Görel kat ötelemelerin karşılaştırılması

Kat No		TBDY-2019*	TDY2007**
		$\lambda * \frac{\delta_{i,max}^x}{h_i}$	$\frac{\delta_{i,max}^x}{h_i}$
3 katlı	1.kat	0.000246	0.00015
	2. kat	0.000461	0.00028
	3.kat	0.000492	0.00030
4 katlı	1.kat	0.000328	0.00028
	2.kat	0.000651	0.00055
	3.kat	0.000735	0.00061
	4.kat	0.000691	0.00056
5 katlı	1.kat	0.000369	0.00030
	2.kat	0.000757	0.00060
	3.kat	0.00088	0.00070
	4.kat	0.000871	0.00067
	5.kat	0.000782	0.00061

*: Sınır değer <0.016

** : Sınır değer <0.02

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada İstanbul/Kartal bölgesi içinde yapılması düşünülen bir binanın TDY-2007 ve TBDY-2019 yönetmeliklerine göre deprem kuvvetleri ve buna bağlı parametreler elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. TBDY-2019 için analizlerde zemin sınıfı ZA, deprem tasarım sınıfı ise I (DTS1) olarak seçilirken TDY-2007'ye göre analizlerde benzer şekilde zemin sınıfı Z1 ve deprem bölgesi I. derece olarak alınmıştır. Analizler farklı kat sayısına sahip betonarme çerçeve + perde taşıyıcı sistemli yapılar için EDY ve MBY'ye göre gerçekleştirilmiştir.

Yapılan karşılaştırmalar doğal titreşim periyodu, görel kat ötelemesi ve taban kesme kuvveti açısından yapılmıştır. Özellikle TBDY-2019 yönetmeliği ile daha kapsamlı bir hal alan yeni deprem yönetmeliğinin getirdiği yenilikler vurgulanmaya çalışılmıştır. Ayrıca etkin kesit rijitliklerinin TBDY-2019'da olmasının sonuçları ne ölçüde değiştirdiği sunulmaya çalışılmıştır. Yapılan çalışmada betonarme çerçeve + perdeli sistemde kullanılan kolon ve kiriş ebatlarının kesit tesirleri ve deplasman kontrolleri açısından yeterli olduğu görülmüştür. Çalışmanın sonunda elde edilen önemli sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- TDY-2007 ile karşılaştırıldığında üç farklı bina yüksekliğine sahip modellerin tamamında 1. doğal titreşim periyod değerleri TBDY-2019'da her iki deprem yönü için de %42-45 oranında daha fazla çıkmıştır. Yapılara gelen deprem kuvvetinin hesabında periyodun önemi TBDY-2019 yönetmeliğinde daha dikkat çekici olacaktır.
- Ele alınan 3,4 ve 5 katlı bina için deprem kuvveti bina ağırlığı oranında artmaktadır. Yapılan analizler ile kat sayısı arttıkça yapıya gelen deprem kuvvetinin arttığı açıkça görülmektedir. Ayrıca bu durum yapı ağırlığının artması ile yapı periyodunun arttığını da göstermektedir. Ancak mevcut literatür incelendiğinde, kat yüksekliği artarak devam eden farklı yapıların statik analizleri sonucu elde edilen taban kesme kuvvetlerinin farklı zemin sınıfında lineer olarak devam etmediği anlaşılmaktadır Ünsal, Öncel ve diğ. (2020).
- TDY-2007 ve TBDY-2019'a göre 3, 4 ve 5 katlı binaların analizlerinde MBY'ye göre hesaplanan taban kesme kuvveti değeri, EDY'ye göre hesaplanan değerden %20 oranında daha az elde edilmiştir. Bu durum her iki yönetmelik için düzenli binalarda MBY ve EDY karşılaştırması için verilen 0.8 katsayısı dikkate alınarak tespit edilmiştir.
- EDY yöntemi MBY yöntemine göre daha güvenli tarafta kalacak şekilde sonuçlar vermektedir. Ancak daha ekonomik çözümlerin elde edilmesi istenildiğinde MBY yönteminin her durumda tercih edilmesi uygun olacaktır.
- Binaların her iki yöndeki EDY'den elde edilen taban kesme kuvvetleri 3-4-5 katlı yapılar için X ve Y yönü için sırasıyla %40-%43 ve %39-47 oranında TBDY-2019'da daha az sonuç vermesiyle sonuçlanmıştır. Mod birleştirme yönteminde ise bu oran sırasıyla %38-46 ve %35-45 şeklindedir. Görüldüğü üzere TBDY-2019 yönetmeliği ile elde edilen taban kesme kuvvetleri TDY-2007'ye göre ciddi mana da azalmaktadır. Bu durum TBDY-2019 yönetmeliğindeki çatlamış kesit rijitliğinin kullanılmasından dolayı sistem periyodunun artmasına ve taban kesme kuvvetlerinin azalmasına yol açmasıyla açıklanabilir.
- Üç farklı kat yüksekliğine sahip konut yapısı için elde edilen görel kat öteleme değerleri sınır değerlerin altında kalmıştır. Bu durum yapıların yatay yükler altında yeterli rijitliğe sahip olduğunun göstergesidir. Üç farklı yapıda bulunan perde miktarı sistemin yanal rijitliği için oldukça etkili olmuştur.

Bu çalışmada yapılan karşılaştırmalar düzensizlik içermeyen çerçeve + perdeli yapılar için yapılmıştır. Yapıdaki taşıyıcı sistem düzensizliklerine bağlı olarak elde edilen sonuçlar değişebileceği, betonarme çerçeve + perdeli binalar için yapılan bu karşılaştırmaların, ileriki çalışmalarda farklı zemin sınıfı ve kat yüksekliğine göre de yapılması faydalı olacaktır. Ayrıca kat sayısının, katlardaki perde yerleşiminin, perde miktarının ve zemin sınıfının değişimine bağlı olarak sonuçların da değişmesi oldukça doğaldır. Burada önemli olan iki yönetmeliğin deprem kuvveti hesap ve kontrol açısından temel farklılıklarının ortaya konması olmuştur.

Referanslar

Aksoylu, C. and M. H. Arslan (2019). "Çerçeve Türü Betonarme Binaların Periyod Hesaplarının Farklı Ampirik Bağıntılara Göre İrdelenmesi." Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 8(2): 569-581.

Aksoylu, C. and M. H. Arslan (2019). "Çerçeve+ Perde Türü Betonarme Binaların Periyod Hesaplarının TBDY-2019 Yönetmeliğine Göre Ampirik Olarak Değerlendirilmesi." Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering 24(3): 365-382.

Aksoylu, C., A. Mobark, M. Hakan Arslan and İ. Hakkı Erkan (2020). "A comparative study on ASCE 7-16, TBEC-2018 and TEC-2007 for reinforced concrete buildings." Revista de la construcción 19(2): 282-305.

Alyamaç, K. E. and A. S. Erdogan (2005). Geçmişten Günümüze Afet Yönetmelikleri ve Uygulamada Karşılaşılan Tasarım Hataları. Deprem Sempozyumu, Kocaeli.

- Arslan, M. H. and İ. H. Erkan (2011). "Betonarme Binaların Deprem Yükü Azaltma Katsayısı Üzerine Yeni Bir Bakış." *Engineering Sciences* 6(4): 1486-1497.
- ASCE7-16 (2017). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures Seismic Design Requirements for Building Structures* Structural Engineering Institute: 89-121.
- Asığçel, Z. (2019). Betonarme binalarda deprem etkisinin DBYBHY 2007 ve TBDY 2018 deprem yönetmeliklerine göre karşılaştırılması, Dicle Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Diyarbakır.
- Balıkçı, İ. (2019). Mevcut binaların deprem performanslarının 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerine göre değerlendirilmesi, Pamukkale Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, Denizli.
- Başaran, V. (2018). "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine (TBDY2019) Göre Afyonkarahisar İçin Deprem Yüklerinin Değerlendirilmesi." *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* 18(3): 1028-1035.
- Başaran, V. and M. Hiçyılmaz (2020). "Betonarme Çerçevelerde Farklı Deprem Yer Hareketi Düzeyi Etkilerinin İncelenmesi." *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology* 2(1): 27-41.
- Bayrak, O. F., M. Bıkçe, M. M. Erdem and E. Emsen (2020). "Dolgu Duvarların Düzlem İçi ve Düzlem Dışı Davranışına Esnek Derzli Bağlantı Elemanının Etkisi." *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 3(1): 24-28.
- Bıkçe, M. and O. F. Bayrak (2018). "Analyzing the Effect of Infill Walls on a RC Structure." *Disaster Science and Engineering* 4(1): 32-39.
- Bozer, A. (2020). "Betonarme Perdelerin Plandaki Yerleşimlerinin Kirişsiz Döşemeli Yapılara Etkisinin İncelenmesi." *Teknik Dergi* 31(1).
- Bozer, A. (2020). "Tasarım Spektral İvme Katsayılarının DBYBHY 2007 ve TBDY 2018 Yönetmeliklerine Göre Karşılaştırması." *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi* 11(1): 393-404.
- Börekçi, M. (2019). "Dolgu duvarlı betonarme binaların hakim periyodunun doğrudan formüller ile elde edilmesi.", *Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(2):161-178.
- Çavdar, Ö., G. Ç. K. Sunca and F. Sunca (2018). "Betonarme Binaların Deprem Performanslarına Dolgu Duvarların Etkisinin İncelenmesi." *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering* 25(1): 465-484.
- Çavdar, Ö. and A. Yolcu (2018). "Mevcut Bir Okul Binasının Türk Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e Göre Yapısal Düzensizliklerinin İncelenmesi." *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi* 8(2): 153-164.
- Dalyan, İ. and B. Şahin (2019). "Mevcut Betonarme Bir Binanın 2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerine Göre Deprem Yükleri Altındaki Taşıyıcı Sistem Performansının Değerlendirilmesi." *Türk Deprem Araştırma Dergisi* 1(2): 134-147.
- Demir, A. and A. Kayhan (2017). "Deprem Yönetmeliği 2007 ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ile Uyumlu Zaman Tanım Alanında Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması, 4." *Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Eskişehir*.
- Eldemir, O. (2019). DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 yönetmeliklerinin mevcut yapıların sismik davranış özellikleri açısından karşılaştırılması, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Erdem, M. M. and M. Bıkçe (2017). "Maksimum Azaltılmış Görelî Kat Ötelemelerinin Güncel (DBYBHY2007) ve Yeni Yönetmelik Taslağına (TBDY2016) Göre Mukayesesi." *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 32(2): 253-262.
- Erdem, N. (2019). Effects of changes in locations of fault zones on property values. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Municipal Engineer, Thomas Telford Ltd.*
- Güngör, K. (2019). Orta yükseklikteki betonarme binaların doğal titreşim periyotlarının arazi çalışmaları ile belirlenmesi, Pamukkale Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Denizli.
- Isik, E., Aydın, M. C., & Buyuksarac, A. (2020). 24 January 2020 Sivrice (Elazığ) earthquake damages and determination of earthquake parameters in the region. *Earthquakes and Structures*, 19(2), 145-156.

- Kap, T., E. Özgan and M. mevlüt Uzunoğlu (2019). "Betonarme Bir Okul Binasının 2018 Deprem Yönetmeliğine Göre İncelenmesi." Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi 7(3): 1140-1150.
- Keskin, E. and K. B. Bozdoğan (2018). "2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerinin Kırklareli İli Özelinde Değerlendirilmesi." Kırklareli University Journal of Engineering and Science 4(1): 74-90.
- Korkmaz, M. (2020). "Analysis of an Educational Building According to TEC2007 and TEC2018." Sciennovation 1(2): 43-50.
- Mahmoud, e. H. A. (2018). Çelik çerçeve binalarda doğrusal hesap yöntemlerinin TDY-2007, EC8, ASCE 7/16 ve TBDY-2018 deprem yönetmeliklerine göre karşılaştırılması, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Mete, Ö. (2019). Deprem yönetmeliklerinde duvar etkisinin incelenmesi, Dicle Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Diyarbakır.
- Nemutlu, Ö. and A. Sarı (2019). 2018 Yeni Türk Deprem Yönetmeliği İle Amerikan Deprem Yönetmeliklerinin Deprem Hesapları Açısından Karşılaştırılması. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Ankara.
- Nemutlu, Ö. F. and A. Sarı (2018). Comparison of Turkish Earthquake Code in 2007 With Turkish Earthquake Code in 2018. International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC 2018), Diyarbakır.
- Newmark, N. M. and W. J. Hall (1982). "Earthquake spectra and design", Engineering monographs on earthquake criteria.
- Othman, M. K. (2017). Çok katlı betonarme yapılarda perdelerin planda yerleşiminin ve perdelerdeki boşlukların deprem davranışına etkisi, Pamukkale Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Denizli.
- Öztürk, M. (2018). "2018 Türkiye bina deprem yönetmeliği ve Türkiye deprem tehlike haritası ile ilgili İç Anadolu Bölgesi bazında bir değerlendirme." Selçuk-Teknik Dergisi 17(2): 31-42.
- Öztürk, M., E. Selekoğlu and T. Baran (2019). Eşdeğer deprem yükü yöntemi bakımından TBDY-2019 ile DBYBHY-2007 kıyaslaması, International Conference on Innovation, Sustainability, Technology.
- Seyrek, E. (2020). "Yeni Türkiye Sismik Tehlike Haritasının Ege Bölgesi İçin Değerlendirilmesi." Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 9(1): 414-423.
- Sümer, Y. and M. Hamsici (2020). "Çok Katlı Betonarme Binalarda 2018 Deprem Yönetmeliği İle Tanımlanan Spektrum Eğrilerinin Etkisi." Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi 8(2): 349-354.
- TBDY (2019). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar. Ankara: 1-416.
- TDY-2007 (2007). "Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik." TC Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi.
- Topçu, S. (2019). Betonarme yüksek bir binanın türkiye bina deprem yönetmeliği'ne göre tasarımının irdelenmesi Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa.
- TS500 (2000). Turkish Building Code. Ankara.
- Tunç, G. and T. Tanfener (2007). "ve 2016 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliklerinin Örneklerle Mukayesesi, 3." Ulusal Yapı Kongresi ve Sergisi Teknik Tasarım, Güvenlik ve Erişilebilirlik Konferansı: 24-26.
- Ulutaş, H. (2019). "DBYBHY (2007) ve TBDY (2018) Deprem Yönetmeliklerinin Kesit Hasar Sınırları Açısından Kıyaslanması." Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi(17): 351-359.
- Ünsal, İ., Öncel, F.A. and F. Şahan (2020). "TDY 2007 ve TBDY 2018 Yönetmeliklerine Göre Yapı Yüksekliğinin Taban Kesme Kuvveti Ve Tepe Deplasmanı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi." Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi 8(4): 930-942.
- Yaman, S., H. Tekeli and F. Demir (2019). "Betonarme Binalarda Perde Yeri Değişiminin Bina Performansına Etkisi." Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi(16): 194-204.



Reaksiyon Bağlı Silisyum Nitrür Seramiklerinde Sinterleme İlavesinin Mikroyapı ve Antibakteriyel Davranışa Etkisinin İncelenmesi

Investigation of the Effect of Sintering Additive on the Microstructure and the Antibacterial Behavior of Reaction Bonded Silicon Nitride Ceramics

Şeniz R. Kuşhan Akın

Çankaya Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Ankara TÜRKİYE

Başvuru/Received: 23/09/2020

Kabul / Accepted: 07/02/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 07/02/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Silisyum Nitrür (Si_3N_4) genellikle yüksek sıcaklık ve yapısal uygulamalarda tercih edilen, üstün özellikli bir oksit dışı seramiktir. Çok sert bir malzeme olmasının yanı sıra, çubuksu beta (β) tanelerin gelişimi ile seramik malzemeler içinde yüksek kabul edilebilecek tokluk değerleri elde etmek mümkün olabilmektedir. Bu özelliklerine ilave olarak biyo uyumluluğunun da anlaşılması ile birlikte özellikle, bu malzemenin biyoseramik olarak kullanım potansiyelini arttırmak amacıyla son on yılda yapılan çalışmaların sayısı da artmıştır. Bu çalışmada da reaksiyon bağlama tekniği ile, çevre biyolojik dokularla entegrasyon açısından avantajlı olan gözenekli Si_3N_4 seramiklerinin üretilmesi amaçlanmıştır. Sinterleme ilavesi olarak sisteme yapılan CaO , Y_2O_3 ve CeO_2 katkılarının, elde edilen Si_3N_4 seramiklerin fiziksel ve mikroyapısal özelliklerine ve bunların sonucu olarak antibakteriyel davranışlarına etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar CeO_2 'in hem *E. coli* hem de *S. aureus* açısından dezavantajlı bir sinterleme ilavesi olduğunu, Y_2O_3 'ün ise en avantajlı ilave olduğunu göstermiştir. CaO ilavesi yapılan sistem ise *E. coli* için düşük, *S. aureus* için yüksek oranda bakteri üremesi ile sonuçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler

" Si_3N_4 , Reaksiyon bağlama, Sinterleme ilavesi, Antibakteriyel özellik"

Abstract

Silicon nitride (Si_3N_4) is a superior non-oxide ceramic material generally preferred for high temperature and structural applications. Besides being a very hard material, it is also possible to achieve relatively high toughness values among the ceramic materials by the formation of elongated beta (β) grains. In addition to these properties, by the understanding of its biocompatibility, the studies to increase the application potential of these materials as bio ceramics is also increased in the last decade. In this study, production of porous Si_3N_4 ceramics which is advantageous by means of the integration of these materials with the surrounding biological tissue was aimed using reaction bonding technique. The effect of CaO , Y_2O_3 ve CeO_2 sintering additives on the physical and microstructural properties and as a result of these two facts, the antibacterial behavior was investigated. Obtained results revealed that CeO_2 is a disadvantageous and Y_2O_3 is an advantageous sintering additive for both the *E. coli* and *S. aureus* bacteria. CaO system is resulted in decreased bacterial proliferation for *E. coli* and increased proliferation for *S. aureus*.

Key Words

" Si_3N_4 , Reaction bonding, Sintering additive, Antibacterial property"

1. Giriş

Düşük sıcaklık alfa (α) ve yüksek sıcaklık beta (β) polimorfik formlarına sahip olduğu bilinen silisyum nitür (Si_3N_4) seramikleri 1950'li yıllardan bu yana yoğun olarak çalışılan ve ticari olarak özellikle rulman, kesici uç, türbin parçaları gibi üstün performans gerektiren yapısal mühendislik uygulamalarında geniş kullanım alanı bulmuş olan oksit dışı bir seramik malzemedir (Collins ve Gerby 1955; Deeley ve diğerleri, 1961; Riley, 2000; Hampshire, 2007). Düşük yoğunluk, yüksek elastik modül, yüksek aşınma direnci, yüksek sertlik ve kendiliğinden takviyeli bir malzeme olarak yüksek kırılma tokluğuna sahip olması ve bu özelliklerini yüksek sıcaklıklarda da koruyabilmesi pek çok alanda tercih edilmesinin temel nedenidir (Riley, 2000; Hampshire, 2007). Bu uygulama alanlarına son yıllarda biyomalzeme olarak kullanım potansiyelinin de eklenmesiyle, Si_3N_4 seramikleri ile ilgili çalışmalar son yıllarda tekrar artış göstermiştir (Guedes e Silva ve diğerleri, 2004; Gorth ve diğerleri, 2012; Pezzotti ve diğerleri, 2017; Mazzocchi ve Bellosi, 2008).

Reaksiyon bağlama yöntemi ile silisyum nitür üretimi (RBSN), şekillendirilmiş silisyum (Si) yaşı peletlerin 1200-1450°C arasında azot gazı (N_2) atmosferinde nitrülenmesi prensibine dayanır (Moulson, 1979; Ziegler ve diğerleri, 1987). Başlangıç malzemesi olarak ucuz olan Si tozu kullanılması, yöntemin en önemli avantajlarından biridir. Nitrüleme sürecinde Si toz kompaktının boyutları değişmez; sinterleme çekme olmaksızın gerçekleşmektedir, bu da prosesin diğer önemli avantajlarından biri olarak kabul edilir. Bu sayede nihai şekle yakın boyutta parçalar üretilmektedir. Böylece karmaşık şekiller herhangi bir ekstra işleme gerek kalmadan üretilebilmektedir. Bu metotla üretilen ürünlerde, Si_3N_4 'ün her iki polimorfik formu da görülmektedir. Elde edilen ürünün porozitesi genellikle hacimce % 12-15 arasında olup, bazen %20'lere çıkmaktadır. Sistemdeki porlar mikron altı boyuttadır ancak porların birleşmesi sonucunda 50 μm 'nin üzerinde büyük porlar da oluşabilir. RBSN için eğme mukavemeti 150-350 MPa arasında değişmektedir. Bunun yanında ürün tekrar yüksek sıcaklıkta sinterlenerek 500 MPa veya üzerindeki mukavemet değerlerine çıkılabilir. Malzemede oldukça az tane sınırlı olduğunda, mekanik özellikler yüksek sıcaklıklarda da korunmaktadır. Mevcut olan porozite ise ancak sonradan uygulanan sinterleme (post-sinterleme) basamağı ile azaltılabilmektedir (Guoa ve diğerleri, 2016). Bu işlem yüksek sıcaklıkta gerçekleştiğinden (1700°C'nin üzerinde) yapıdaki α fazının tamamı β 'ya dönüşmekte ve ayrıca sonuç malzemenin yoğunluğu da artmaktadır.

Reaksiyon bağlama yöntemiyle elde edilen β - Si_3N_4 seramiklerinin biyoseramik olarak kullanımı üzerine literatürde bulunan çalışmalar bu malzemelerdeki sitotoksite, biyoaktivite, implant-sert doku arasındaki etkileşimin iyileştirilmesi ve mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmalardır (Kue ve diğerleri, 1999; Sohrabi ve diğerleri, 2000; Bodišová ve diğerleri, 2013). Hatta 2018 yılında yayınlanmış olan bir makalede, reaksiyon bağlama tekniği ile üretilmiş olan silisyum nitür seramik disklerin 30 yıllık ön lombar interbody füzyonu sonuçları açıklanmış olup, bu malzemenin umut verici bir biyoseramik malzeme olduğu görülmüştür (Mobbs ve diğerleri, 2018). Yapılmış olan bu çalışmalar, reaksiyon bağlama yöntemi ile üretilmiş olan silisyum nitür seramiklerinin, omurga cerrahisinde kullanımının avantajlarını göstermiş olup, klinik kullanımları devam etmektedir. Ancak günümüzde, implant ile ilişkili bakteriyel enfeksiyonlar sadece Amerika Birleşik Devletleri'nde her yıl 100.000'den fazla ölümle sonuçlanmakta olduğu halde (Ahmed ve diğerleri, 2019), reaksiyon bağlı silisyum nitür malzemelerde sinterleme ilavesinin değişimine bağlı olarak antibakteriyel özellikler incelenmemiştir.

Bu çalışmada, reaksiyon bağlama tekniği ile üretilmiş olan üç ayrı sistemin (sinterleme ilavesi olarak CaO , Y_2O_3 ve CeO_2 içeren sistemler), ortopedik implant uygulamalarında en yaygın olarak görülen gram-pozitif bir tür olan *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) (Saadatian-Elahi ve diğerleri, 2008) ve yine yaygın gözlenen gram-negatif bir tür olan *Escherichia coli* (*E. coli*) bakterilerine karşı gösterdikleri direncin incelenmiştir.

2. Materyal ve Metod

Reaksiyon bağlama tekniği ile Si_3N_4 üretimi için Si kaynağı olarak Aldrich firmasına ait Si tozu kullanılmıştır (325 mesh, %99 saflıkta). Sinterleme ilaveleri ağırlıkça %10 oranında yapılmış olup; biyoaktivite açısından tercih edilen CaO (CaCO_3 formunda), Si_3N_4 üretiminde en yaygın olarak tercih edilen ilavelerden biri olan Y_2O_3 ve mikroyapısal gelişimin etkisinin değerlendirilebilmesi amacıyla CeO_2 kullanılmıştır. (Aldrich, %99,9 saflıkta).

Hazırlanan kompozisyonlar, homojen bir dağılım elde edilebilmesi amacıyla turbula ile karıştırılmıştır. Şekillendirme tek yönlü preste yaklaşık 25 MPa basınç altında gerçekleştirilerek, 10.3 mm çapında ve yaklaşık 1.5-2 mm yüksekliğinde peletler elde edilmiştir.

Reaksiyon bağlama işlemi atmosfer kontrollü yatay tüp fırında gerçekleştirilmiştir. İstenmeyen oksit reaksiyonlarını önlemek amacıyla, numuneler yerleştirildikten sonra fırın önce vakuma alınıp sonrasında içerisine N_2 gazı verilerek, fırın atmosferi ısınma başlamadan önce temizlenmiştir (3 defa). 10°C/dk ısıtma hızıyla 1420°C'ye ısıtma sonrasında reaksiyon için 2 saat beklenmiş, sonrasında soğumaya geçilmiştir. RBSN sürecinin tamamlanabilmesi literatür çalışmalarına göre uzun saatler almaktadır. Bu çalışmada süre çekirdek etkisinin net olarak gözlenebilmesi amacıyla özellikle kısa tutularak β - Si_3N_4 faz oranının değişiminin karşılaştırması yapılmıştır.

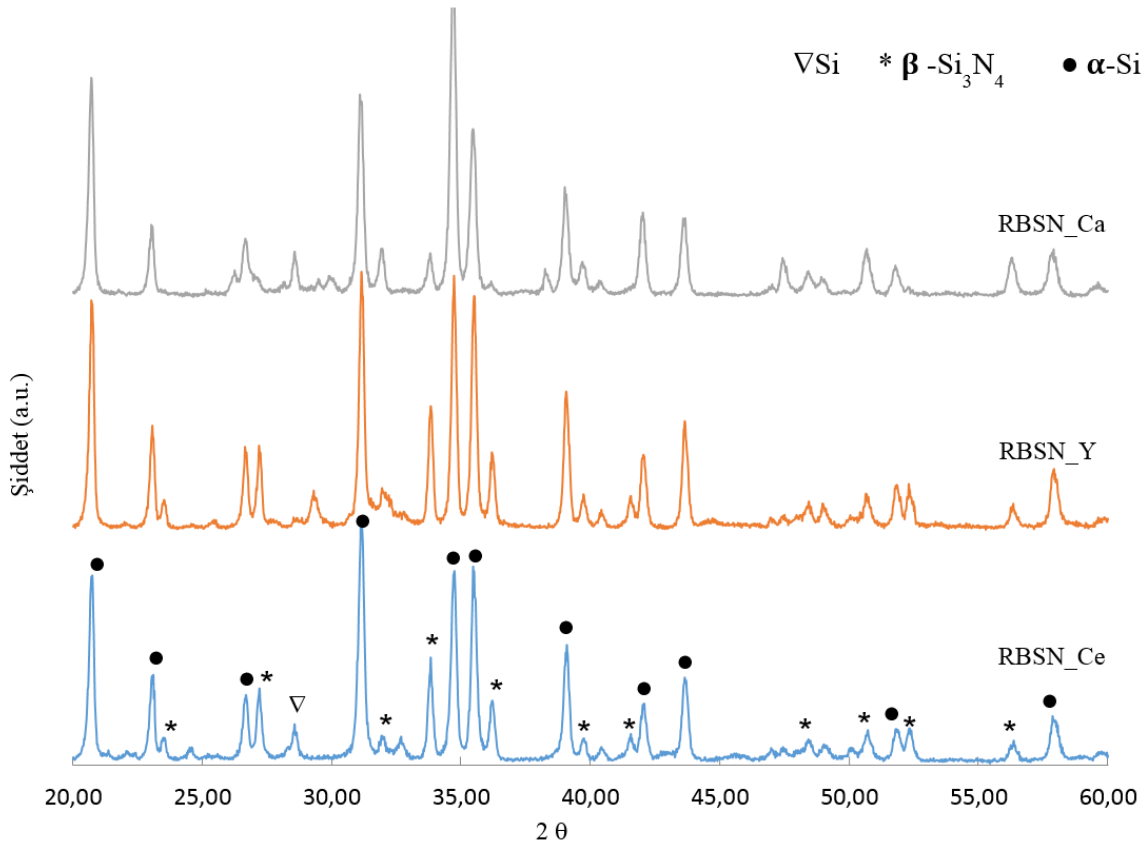
Rigaku Rint 2000 X-ışınları difraktometresi ile yapılan faz analizinde $\text{CuK}\alpha$ ışınması kullanılmıştır ($\lambda=1.54056\text{\AA}$). 2 θ açıları 20-60° arasında tutulmuştur. Si_3N_4 sistemine ait dört temel pik 32-38° 2 θ açılarında oluşmaktadır. α ve β fazlarının yaklaşık oranları pik şiddetlerinden hesaplanmıştır (Gazzara ve Messier, 1977). Numuneler elektron mikroskopunda mikroyapısal inceleme öncesi platin

(Pt) kaplama işlemine tabi tutulmuştur. Hitachi S-4800 alan emisyonlu taramalı elektron mikroskopuyla (FE-SEM), numunelerin kırık yüzeyden mikroyapı analizleri ikincil elektronlarla (SEI) yapılmıştır.

Numuneler Gram-pozitif *S. aureus* (ATCC 25923) ve Gram-negatif *E. coli* (ATCC 25922) tipi bakterilere karşı test edilmiştir. Çalışmada kullanılan bakteriler American Type Culture Collection (Manassas, VA)'dan temin edilmiştir. Her bir bakteri türünden birer koloni ayrı tüplerdeki besi yerlerine aşılanarak, 37°C'deki çalkalama hücrelerinde 24 saat bekletilmiş böylece çoğalmaları sağlanmıştır. Bakteri çalışmaları için başlangıç konsantrasyonu olarak 10^5 cells/mL seçilmiştir. Optik absorbans kullanılarak ayarlanan bu konsantrasyondaki bakteri solüsyonu, kuyulu plaka içine yerleştirilen numunelerin üzerine eşit miktarda ve numunelerin tamamını kaplayacak şekilde eklenmiştir. Her bir bakteri sistemi, üç ayrı numune kullanılarak test edilmiştir. Solüsyon içindeki numuneler, 24 saatlik inkübasyon süresi sonunda Fosfat Tampon Tuz Çözeltisi (PBS) ile yıkanma sonrasında uygun boyuttaki steril tüplere alınmış ve bu tüpe yeterli miktarda (numuneleri tamamen kaplayacak şekilde) PBS eklenerek 10 dakika sonikasyona tabi tutulmuştur. Sonrasında 10 saniyelik vorteks uygulama işlemi ardından, her bakteri tipi için 4 farklı (1:1000, 1:10000, 1:100000, and 1:1000000) seyrelti hazırlanmıştır. %1.5 agar ve % 3.0 of Tryptic Soy Broth (TSB) karışımlarının dökülüp soğutulmasıyla önceden hazırlanmış olan petri kaplarına bu farklı seyreltilerden $10\mu\text{l}$ 'lik 3'er damla damlatılmış ve steril bir ortamda 15 dakika kurumaya bırakılmıştır. Sonrasında bu petri kaplar üstleri kapatılarak % 5 CO_2 ve 37°C koşullarında çalışan bir inkübatörde, kolonilerin sayılabilecek büyüklüğe gelmeleri için 12 saat beklenmiştir. Bazı numunelerin kalınlıklarındaki farklılıklar dikkate alınarak, hassas bir ölçüm yapılabilmesi açısından numunelerin solüsyonla temas halinde olan yüzey alanları üzerinden hesaplama yapılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

RB yöntemiyle üretilmiş olan numunelere ait faz karakterizasyonu sonuçları Şekil 1'de ve bu analiz sonuçları neticesinde hesaplanmış olan faz oranları Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1 aynı zamanda Arşimet metodu ile yapılan yoğunluk analizi sonucunda hesaplanmış olan % teorik yoğunluk ve reaksiyon bağlama prosesinin gerçekleşme oranının bir göstergesi olan ağırlık artışı değerlerini de göstermektedir.



Şekil 1. Farklı sinterleme ilaveleri içeren RBSN numunelerine ait XRD paternleri

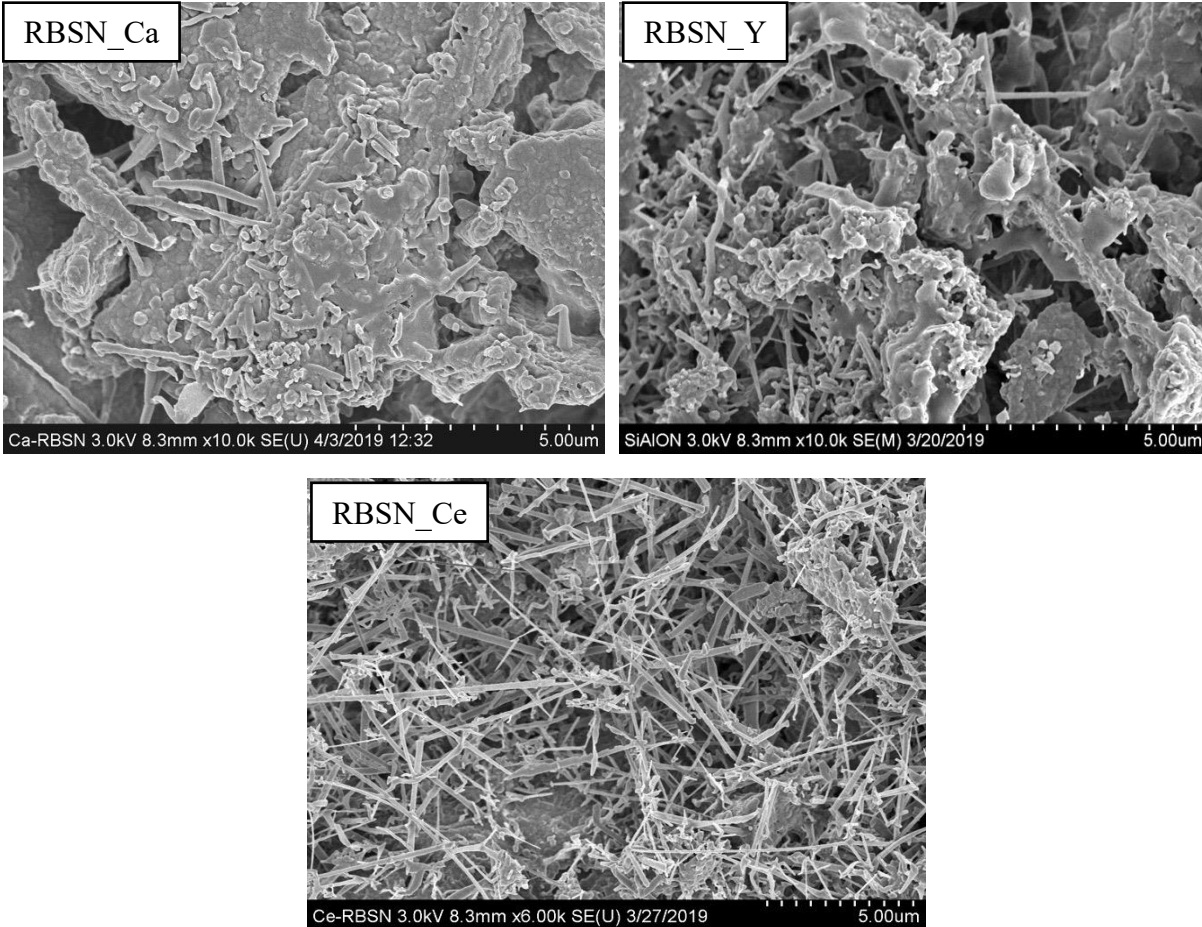
Tablo 1. RBSN numunelerine ait % ağırlık artışları, % teorik yoğunluklar ve faz oranları

	% Ağırlık Artışı	%Teorik Yoğ.	Faz kompozisyonu
RBSN_Y	54,99	59	19 % β -Si ₃ N ₄ + 81 α - Si ₃ N ₄
RBSN_Ce	54,03	58	18 % β -Si ₃ N ₄ + 82 α - Si ₃ N ₄
RBSN_Ca	42,84	56	6 % β -Si ₃ N ₄ + 94 α - Si ₃ N ₄

Ağırlık artışı, reaksiyon bağlama sürecinin bir kanıtı olup, nitrürleme oranını anlamamanın bir yolu olarak değerlendirilmektedir. Si'un nitrürlenmesi sürecinde 2.3 g.cm⁻³'lük yoğunluktan, Si₃N₄'ün yoğunluğu olan 3.2 g.cm⁻³'e geçişte, ağırlık ve hacim artışı meydana gelir. %66'lık bir ağırlık artışı gözlenmesi durumunda nitrürleme süreci tam başarılı olarak kabul edilir. Bu çalışmada Y, Ce ve Ca ilave edilmesi durumunda sırasıyla %59, 58 ve 56 teorik yoğunluk değerlerine ulaşılabilmiştir. En yüksek ağırlık artışı Y içeren sistemde meydana gelmiştir. İncelenen üç ayrı sistemde de %66'lık ağırlık artışına ulaşılammış olması, proses süresinin kısa tutulmuş olmasından kaynaklanmaktadır. Oluşan Si₃N₄ tanelerinin merkezinde hala bir miktar Si bulunduğu düşünülmektedir.

20-60 2θ arası yapılan faz karakterizasyonuna ait grafikler, karşılaştırmalı olarak Şekil 1'de verilmiştir. Buna göre Ca içeren sistemde 28 derecede kalıntı Si piki gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ağırlık artışı verileri ile uyumlu olup, özellikle ağırlık artışının en düşük olduğu Ca içeren sistemde kalıntı Si varlığı XRD verileri ile görülmüştür. Bunun dışındaki pikler α ve β -Si₃N₄ fazlarına aittir. α -Si₃N₄ piklerinin β -Si₃N₄ fazına göre daha şiddetli olduğu görülmüş olup, kantitatif analiz sonucu RBSN_Y, RBSN_Ce ve RBSN_Ca numunelerindeki β -Si₃N₄ oranı sırasıyla % 19, % 18 ve % 6 olarak hesaplanmıştır. Düşük oranda β -Si₃N₄ oluşumu beklenen bir sonuç olup, yukarıda da belirtilmiş olduğu gibi reaksiyon sıcaklığının düşük ve sürenin kısa olmasından kaynaklanmıştır.

Numunelere ait ikincil elektron görüntüleri numunelerin sinterleme ilavesinin bir sonucu olarak RBSN_Ca, RBSN_Y ve RBSN_Ce numunelerinin morfolojik yapılarında meydana gelen önemli farklılıkları ortaya koymaktadır (Şekil 2).

**Şekil 2.** Farklı sinterleme ilavesi içeren numunelere ait SE görüntüleri

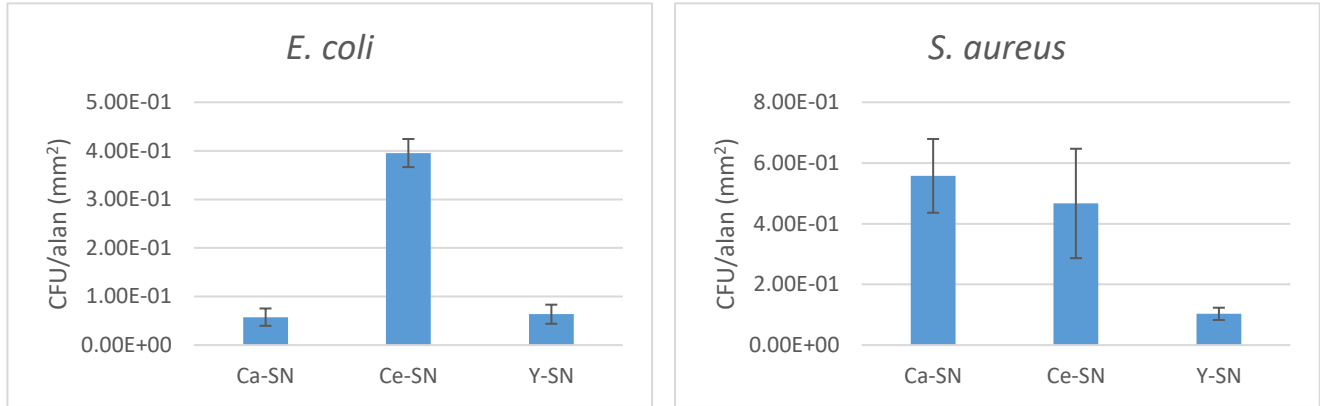
RBSN_Ce numunesinde belirgin şekilde iğnemsî/çubuksu yapıda tane gelişim gözlenmiştir. Bu çubuksu taneler, literatürde gaz fazı reaksiyonu sonucunda oluştuğu söylenen verilerle oldukça benzerdir. Bu tür tanelerinin RBSN_Y numunesinde de -daha az oranda

olmakla birlikte- bulunduğu, RBSN_Ca numunesinde ise eser miktarda bulunduğu gözlenmiştir. Literatürde yer alan termodinamik hesaplamalar incelendiğinde, Si'un azot ile bütün fiziksel hallerde reaksiyona girebildiğini görülmektedir (Moulson,1979; Jennings, 1983);



Ayrıca, Si₃N₄ oluşumundaki alternatif bir yöntem de gaz haldeki silisyum monoksit (SiO) ve azotun reaksiyonudur. Genel olarak α-Si₃N₄'ün, nitridasyonun erken safhalarında ve daha düşük sıcaklıklarda, β-Si₃N₄'ün ise Si'un erime noktasının üstünde olduğu bilinmektedir. Reaksiyonlar (1) ve (2) Si'un erime noktasına yakın sıcaklıklarda (1410°C) meydana gelirken, reaksiyon (3) Si'nin erime noktasının üzerinde, daha yüksek sıcaklıklarda uygun hale gelir. Reaksiyon oldukça ekzotermik olduğundan, sıcaklık tam olarak kontrol edilemez. Sisteme sinterleme ilavelerinin eklenmesi durumunda ise sistemin termodinamiği tamamen değişmektedir. Yürütülen çalışmada Ca içeren sistem daha düşük sıcaklıkta ötektik oluşumuna, dolayısıyla sıvı fazı reaksiyonuna neden olurken, Ce gibi daha yüksek valans değerine sahip bir katyon içeren sistemde ağırlıklı olarak gaz fazı reaksiyonun gözlenmesi ve buna bağlı olarak da iğnemsiz tanelerin oluşumu beklenebilir. Aynı olayın, α→β faz dönüşümünde de farklılık gözlenmesine de neden olduğu, Tablo 1'deki farklı α-Si₃N₄ ve β-Si₃N₄ oranlarından anlaşılmaktadır.

Her iki tür bakteri için antibakteriyel test sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, her iki tip bakteri de göz önünde bulundurulduğunda, hem Gram-pozitif hem de Gram-negatif bakteriler için Y₂O₃'ün en avantajlı sinterleme ilavesi olduğunu, CeO₂'in ise her iki bakteri türü için de bakteri üremesi açısından dezavantajlı olduğunu göstermiştir. CaO ilavesi yapılan sistem ise Gram-negatif *E. coli* için düşük, Gram-pozitif *S. aureus* için yüksek oranda bakteri üremesi ile sonuçlanmıştır.



Şekil 3. Farklı ilaveler içeren RBSN numunelerinin antibakteriyel test sonuçları

Malzemelerin gösterdikleri bakteriyel direncin hem mikroyapısal gelişime (pürüzlülük, gözenek yapısı vs) hem de temas halindeki yüzeyin kimyasal kompozisyona bağlı olduğu bilinmektedir. Yürütülen bu çalışmada Y ve Ce içeren sistemlerde, elde edilen faz oranları ve gözeneklilik açısından benzerlik gözlenmiştir (Tablo 1). Bu nedenle bakteri testi sonuçlarında elde edilen bu farklılık iki farklı parametre ile açıklanabilir; (i) İki sistemde gözlenen farklı mikroyapısal gelişim, (ii) Bu iki farklı ilavenin neden olduğu fonksiyonel gruplarda ve O:N oranındaki farklılıklar. Aynı zamanda bu iki ilavedeki katyonların valans değerlerindeki farklılıklar reaktif oksijen miktarında da da değişikliğe dolayısıyla da bakteri direncinde değişikliğe neden olabilmektedir. Ca içeren sistemin ise faz oranları ve gözenek miktarı da farklı olduğundan daha bağımsız olarak değerlendirilmesi mümkündür.

β-Si₃N₄'de çözünen oksijen oranının α-Si₃N₄'den daha düşük olduğu bilinmektedir. Bu nedenle faz analizi sonucuna göre α-Si₃N₄ oranı daha yüksek olan Ca içeren sistemde yapıda daha yüksek oranda oksijen olması beklenmektedir. Bu durumun Si₃N₄'ün yüzeyindeki iki fonksiyonel gruptan silanol (Si-OH) oranının yüksek, amin (-NH₂) oranının ise düşük olmasına yol açması beklenmektedir. Amince zengin yüzeylerin ise biyolojik sıvıların içine amonya (NH₃) and silisik asit (H₄SiO₄) saldığı bilinmektedir. NH₃ peroksinitrit anyonuna (O=NOO-) dönüşerek bakteriler için toksik bir ortam oluşturabilmektedir (Bock ve diğerleri, 2015). Bu nedenle yüksek α-Si₃N₄ oranı olan Ca içeren sistemde beklenen düşük amin oranının da bakteri direncini azalttığı düşünülmektedir. Ayrıca bu kimyasal etki dışında gözenek miktarındaki artış, bakterilerin tutunma alanlarını da arttırabilmektedir. İki farklı tip bakteride gözlenen fark Gram-pozitif ve Gram-negatif bakterilerin membran yapılarından kaynaklanmaktadır; Gram-negatif bakteriler ince ve penetrasyonun zor olduğu, dolayısıyla da antibiyotiklere karşı daha dirençli bir bakteri grubu olup, Gram-pozitif bakteriler ise kalın ve

çok fazla yabancı maddeyi içene alabilen bir membran yapısına sahiptir. Bu nedenle Ca sisteminde oluşan toksik ortamın Gram-pozitif türü olan *S. aureus* bakterisinde bakteri direncinin düşürülmesine neden olduğu görülmektedir. Özellikle ortopedik uygulamalarda en sık gözlenen bakteri türü *S. aureus* olduğundan (Saadatian-Elahi, 2008), Ca takviyeli sistem, reaksiyon bağlama tekniği ile üretilmiş bir Si_3N_4 malzemenin ortopedik amaçlı kullanımını için avantajlı kabul edilemeyecektir. Kaldı ki biyo amaçlı kullanılan bir malzemeden, her iki grup bakteriye de belli oranda direnç gösterebilmesi önemlidir. Bu açılarından bakıldığında yürütülen çalışmada, reaksiyon bağlama tekniği ile üretilen Si_3N_4 malzemelerde antibakteriyel davranış açısından en avantajlı sinterleme ilavesinin Y_2O_3 olduğu görülmüştür.

4. Sonuç

Bu çalışmada, sinterleme ilavesi olarak CaO, Y_2O_3 ve CeO_2 içeren ve reaksiyon bağlama tekniği üretilen Si_3N_4 seramiklerin faz oranları, gözenek miktarları, mikroyapısal gelişimleri ve bunların sonucu olarak da *S. aureus* ve *E. coli* tipi bakterilere karşı gösterdikleri davranışlar incelenmiştir. Buna göre;

- Y_2O_3 , CeO_2 ve CaO içeren sistemlerde sırasıyla %59, 58 ve 56 teorik yoğunluk değerlerine ulaşılabilmiştir. En düşük gözenek miktarı Y içeren sistemde meydana gelmiştir.
- Y_2O_3 , CeO_2 ve CaO içeren numunelerdeki β - Si_3N_4 oranı sırasıyla % 19, % 18 ve % 6 olarak hesaplanmıştır. Literatürde yer alan bazı kaynaklara göre düşük oranda β - Si_3N_4 oluşumu beklenen bir sonuç olup, reaksiyon sıcaklığının düşük ve sürenin kısa olmasından kaynaklanmıştır.
- Bu üç ayrı sinterleme ilavesinde Si_3N_4 oluşum reaksiyonlarının farklılık göstermesi nedeniyle farklı mikroyapısal gelişimler izlenmiştir. Özellikle Ce içeren sistemlerde gaz fazı reaksiyonun bir sonucu olarak iğnemsî tane oluşumu gözlenirken, bu yapının Ca içeren numunelerde bulunmadığı görülmüştür.
- Bakteri testi sonuçları *E. coli* için Y_2O_3 'ün en avantajlı sinterleme ilavesi olduğunu, CeO_2 'ün ise her iki bakteri türü için de bakteri üremesi açısından dezavantajlı olduğunu göstermiştir. CaO ilavesi yapılan sistem ise *E. coli* için düşük, *S. aureus* için yüksek oranda bakteri üremesi ile sonuçlanmıştır.

Teşekkür

Bu çalışmanın antibakteriyel testleri Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 2219 Burs Programı desteği ile Northeastern Üniversitesi'nde gerçekleştirilmiştir. TÜBİTAK'a maddi desteğinden dolayı teşekkür ederim.

Referanslar

- Ahmed, W., Zhai, Z. & Gao C. (2019). Adaptive antibacterial biomaterial surfaces and their applications. *Materials Today Bio* Volume 2, 100017.
- Bock, R.M., McEntire, B.J., Bal, B.S., Rahaman, M.N., Boffelli, M. & Pezzotti, G. (2015). Surface modulation of silicon nitride ceramics for orthopaedic applications, *Acta Biomaterialia* 26, 318–330.
- Bodišová, K., Kašiarová, M., Domanická, M., Hnatko, M., Lenčes, Z., Nováková, Z.V., Vojtaššák, J., Gromošová, S. & Šajgalík P. (2013). Porous silicon nitride ceramics designed for bone substitute applications. *Ceramics International*, Volume 39, Issue 7, 8355-8362.
- Collins, J.F. & Gerby, R.W. (1955). New Refractory Uses for Silicon Nitride, *Reported Journals of Met.*, 7, 612-615.
- Deeley, G.G, Herbert, J.M. & Moore, N.C. (1961). Dense Silicon Nitride. *Powder Metall.*, 8, 145-151.
- Gazzara, C.P. & Messier, D.R. (1977). Determination of phase content of Si_3N_4 by X-ray diffraction analysis. *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 56(9), 777-780.
- Gorth, D.J., Puckett, S., Ercan, B., Webster, T.J., Rahaman, M. & Bal, B.S. (2012). Decreased bacteria activity on Si_3N_4 surfaces compared with PEEK or titanium. *International Journal of Nanomedicine*, 7, 4829-40.
- Guedes e Silva, C.C., Higa, O.Z. & Bressiani, J.C. (2004). Cytotoxic evaluation of silicon nitride-based ceramics. *Materials Science and Engineering: C*, 24(5), 643-646.
- Guoa, W.M., Wu, L.X., Ma, T., You, Y. & Lin, H.T. (2016). Rapid fabrication of Si_3N_4 ceramics by reaction-bonding and pressureless sintering. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 36, 3919-3924.

- Hampshire, S. (2007). Silicon nitride ceramics—review of structure, processing and properties. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 24, 1, 43-50.
- Jennings, H.M. (1983). Review. On reactions between silicon and nitrogen, part 1: Mechanisms. *J. Mat. Sci*, 18 (4), 951-967.
- Kue, R., Sohrabi, A., Nagle, D., Frondoza, C. & Hungerford, D. (1999). Enhanced proliferation and osteocalcin production by human osteoblast-like MG63 cells on silicon nitride ceramic discs. *Biomaterials*, Volume 20, Issue 13, 1195-1201.
- Mazzocchi, M. & Bellosi, A. (2008). On the Possibility of Silicon Nitride as a Ceramic for Structural Orthopaedic Implants. Part I: Processing, Microstructure, Mechanical Properties, Cytotoxicity. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 19, 2881-2887.
- Mobbs, R.J., Rao, P.J., Phan, K., Hardcastle, P., Choy, W.J., McCartney, E.R., Druitt, R.K., Mouatt, C.A.L. & Sorrell, C.C. (2018). Anterior Lumbar Interbody Fusion Using Reaction Bonded Silicon Nitride Implants: Long-Term Case Series of the First Synthetic Anterior Lumbar Interbody Fusion Spacer Implanted in Humans. *World Neurosurg*, 120:256-264.
- Moulson, J. (1979) Review, Reaction - bonded silicon nitride, its formation and properties. *J. Mat. Sci.*, 14 (5), 1017-1051.
- Pezzotti, G., Marin, E., Adachi, T., Rondinella, A., Boschetto, F., Zhu, W., Sugano, N., Bock, R., McEntire, B. & Bal, B.S. (2017). Bioactive silicon nitride: A new therapeutic material for osteoarthropathy, *Scientific Reports*, 7, 44848, 1-10.
- Riley, F.L. (2000). Silicon Nitride and Related Materials. *J. Am. Ceram. Soc.*, 83, 245–265.
- Saadatian-Elahi, M., Teysou, R. & Vanhems, P. (2008). Staphylococcus aureus, the major pathogen in orthopaedic and cardiac surgical site infections: A literature review. *International Journal of Surgery*, Volume 6, Issue 3, 238-245.
- Sohrabi, A., Holland, C., Kue, R., Nagle, D., Hungerford, D.S. & Frondoza, C.G. (2000). Proinflammatory cytokine expression of IL-1 β and TNF- α by human osteoblast-like MG-63 cells upon exposure to silicon nitride in vitro. *Journal of Biomedical Materials Research*, Volume 50, Issue 1, 43-49.
- Ziegler, G., Heinrich, J., Wötting, G. (1987). Relationships between processing, microstructure and properties of dense and reaction-bonded silicon nitride. *J. Mater. Sci.*, 22, 3041-3086.



B₂O₃ Katkılı M-Tipi Baryum Hekzaferrit Kompozit Kalıcı Mıknatısın Üretimi ve Karakterizasyonu

Production and Characterization of B₂O₃ Added M-Type Barium Hexaferrite Composite Magnet

Gülten Sadullahoğlu

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, 67100, İncivez, Zonguldak, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 15/05/2020

Kabul / Accepted: 07/02/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 07/02/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Kompozit (BaFe₁₂O₁₉)_{1-x}(B₂O₃)_x (0 ≤ x ≤ 0.1) hekzaferrit örnekleri toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiştir. Malzemelerin yapısal ve manyetik özellikleri X – Işını Difraksiyonu (XRD) ve Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) ile belirlenmiştir. XRD analizi sonuçlarına saf M-Tipi BaFe₁₂O₁₉ ferrit fazı sadece katkısız örneklerde elde edilmiş, B₂O₃ ilavesi ile birlikte BaFe₁₂O₁₉ fazının yanı sıra hematit (α-F₂O₃) ikinci bir faz olarak tespit edilmiştir. Kompozit ferrit malzemelerinin doyum manyetizasyonu (M_s) ve kalıcı manyetizasyon (M_r) B₂O₃ katkısındaki artış ile birlikte azalmıştır. Zorlayıcı alan (H_c) en yüksek değere x = 0.05 olduğunda ulaşmış, katkı miktarı daha da arttığında ana fazın hematit (α-F₂O₃) olması ve malzeme içerisinde kalıcı manyetik ferrit miktarının azalması nedeniyle H_c düşmüştür. Üretilen B₂O₃ katkılı baryum hekzaferrit kompozit malzemelerinden en iyi kalıcı manyetik özellikler x = 0.05 olduğunda elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Manyetik özellikler, baryum hekzaferrit, histerezis eğrisi, kalıcı mıknatıs”

Abstract

The composite (BaFe₁₂O₁₉)_{1-x}(B₂O₃)_x (0 ≤ x ≤ 0.1) hexaferrite samples were produced by powder metallurgy method. Structural and magnetic properties of the materials were determined by using X – Ray Diffraction (XRD) ve Vibrating Sample Magnetometer (VSM). According to the results of XRD analysis pure BaFe₁₂O₁₉ ferrite phase was obtained for only undoped sample, with the addition of B₂O₃, hematite ((α- F₂O₃) was detected as a second phase. Saturation magnetization (M_s) and remanent magnetization (M_r) decreased with the increase in B₂O₃ addition. Coercivity (H_c) reached to a maximum value at x = 0.05, with the further increase in the amount of the additive, H_c decreased due to that hematite (α-F₂O₃) was matrix phase and the amount of hard magnetic ferrite decreased in the material. In the produced B₂O₃ added composite barium hexaferrite materials the best hard magnetic properties were obtained at x = 0.05.

Key Words

“Magnetic properties, barium hexaferrite, hysteresis curve, permanent magnet”

1. Giriş

Ticari bir öneme sahip olan Baryum hekzaferrit ($BaFe_{12}O_{19}$) kalıcı mıknatısı magnetoplumbit kristal yapısına sahiptir ve hekzagonal birim hücrede toplam 64 atom bulunmaktadır. Boyutları birbirine yakın olan Ba^{2+} ve O^{2-} iyonları ferromanyetik değildir ve bu iyonlar sıkı paket hekzagonal yapı düzeninde yer alırken daha küçük boyuttaki Fe^{3+} iyonlarının konumlandığı 12k, 2a, 2b noktalarındaki spinlerin doğrultuları 4f1 ve 4f2 noktalarındaki Fe^{3+} iyonlarının spinlerinin doğrultularına zıt yöndedir. Bu noktada baryum hekzaferritin toplam manyetizasyon değeri malzemeye ilave edilen katkı iyonlarının hekzagonal birim hücre içerisinde işgal ettikleri konumlara bağlıdır, ferromanyetik olmayan katkılar birim birim hücrede toplam manyetizasyon değerini azaltan 4f1 ve 4f2 konumlarını tercih ettiğinde toplam manyetizasyonu artırırken 12k, 2a, 2b noktalarına yerleştikleri zaman düşmesine neden olurlar. Baryum hekzaferrit kalıcı mıknatısların magnetokristal anizotropi sabiti (K) 0.33 MJ/m^3 ve manyetik anizotropi alanı (H_a) 17 kOe (1.7 T) 'dır. Stronsiyum hekzaferritler için anizotropi alanı biraz daha yüksektir (0.35 MJ/m^3) (Cullity & Graham, 2009; Skomski & Coey, 1999; Goldman, 2006).

M – Tipi hekzaferritlerin manyetik özelliklerini geliştirmek amacıyla yapılan birçok araştırmada katkı elementlerinin etkileri incelenmiştir. Bu çalışmalar arasında Meng & Li (2013) Sol_Jel yöntemiyle üretilen baryum hekzaferrit nanotozlarının Dy katkısıyla doyum manyetizasyonunda (M_s) artış olduğunu ancak zorlayıcı alan (H_c) 'da giderek azalma gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Zhou vd., (2014) çalışmalarında, farklı oranlarda Pr ve Dy nadir toprak katkılarının Stronsiyum hekzaferritin magnetoplumbit birim hücredeki latis parametrelerine etkilerini incelemiş ve bu katkıların malzemenin zorlayıcı alan değerinde artışa neden olurken doyum manyetizasyonunda azalmaya neden olduğunu belirtmişlerdir. Aynı çalışmada katkı elementlerinin magnetoplumbit yapı içerisindeki çözünürlüklerinin sınırlı olmasının mikroyapıda Fe_2O_3 yada diğer oksit fazların da oluşmasına neden olduğu da yer almaktadır.

Chen vd., (2010), Yasmin vd., (2018), Ali vd., (2013) M-Tipi hekzaferritlerin manyetik özelliklerde en iyi değerleri elde etmek için belirli oranlarda diğer nadir toprak katkılarından sırasıyla La, Sm ve Tb, kullanmışlardır. Doroftei vd., (2006) tarafından yapılan araştırmada La, Er ve Gd katkılı stronsiyum hekzaferrit örnekleri içinde en yüksek zorlayıcı alan değeri (H_c) La katkılı numune için 3400 Oe olarak en yüksek doyum manyetizasyonu (M_s) değeri ise Gd katkılı örnek için 48.10 emu/g olarak elde edilmiştir.

Awadallaha vd., (2016) tarafından yapılan çalışmada Mössbauer spektroskopisi ile Cu katkısının M-tipi hekzaferritin birim hücrede hangi noktaları işgal edebileceğini incelenmiştir. Buna göre Cu^{3+} iyonları, katkı oranına bağlı olarak birim hücre'e 4f1 ve 2b konumlarını tercih etmiş bu da malzemenin anizotropi alanının (H_a) ve zorlayıcı alan (H_c) değerinin düşmesine neden olmuştur. Ferromanyetik olmayan katkıların tercihen 4f1 ve 4f2 konumundaki Fe^{3+} iyonlarının yerlerini işgal ettikleri zaman antiferromanyetik yönelmeye sahip birim hücrede bu konumlardaki Fe^{3+} iyonlarının manyetik momentleri ters doğrultuda yönlendiği ve toplam manyetizasyonu azalttığı için bu latis noktalarında toplam manyetik momentte meydana gelen azalmanın birim hücredeki toplam manyetik moment değerini arttırdığı ve böylece malzemenin manyetizasyon değerini yükselttiği görülmüştür.

Awawdeh vd., (2014) Mössbauer spektroskopisi çalışmalarında bazı katkı elementlerinin magnetoplumbit kristal yapısında Fe^{3+} iyonlarının konumlandığı yerlerde farklı noktaları tercih ettiklerini belirtmişlerdir. Aynı çalışmada, Baryum hekzaferrite eklenen katkılardan Galyumun (Ga) 4f2, Alüminyumun (Al) 4f1, 4f2 ve 2a, Kromun (Cr) 12k, 2a, 4f2 konumlarını işgal ettikleri yer almaktadır. Yine bu konuda Vinnik vd., (2015) çalışmalarında Zn katkısının tercihen tetrahedral 4f1 ve oktahedral 2b 'de konumlandığını belirtmişlerdir. Elde edilen bu sonuçlarda M-Tipi hekzaferrite katılan elementlerin birim hücre içerisinde farklı noktaları tercih etmesinden dolayı malzemenin manyetik özelliklerini önemli derecede etkilediği görülmüştür.

M-tipi hekzaferritlerin manyetik özelliklerini geliştirmek amacıyla katkı elementleri ikili olarak da kullanılmıştır. Kang vd., (2015) Mn-Zn, Neupane vd., (2017) Dy-Al, Liu vd., (2017) Zn-Sn, Ashiq vd., (2015) Gd-Sn, Yasmina vd., (2019) Ce-Mn, Yang vd., (2019) Pr-Cu, Khan vd., (2014) Tb-Zn ikili katkılarının M-tipi kalıcı mıknatısların yapısal ve manyetik özelliklerine etkilerini incelemişlerdir.

M-Tipi hekzaferritlerin manyetik özelliklerini iyileştirmek amacıyla yapılmış olan katkıların yanısıra Fe/Ba oranı ve sıcaklık gibi üretim parametreleri ya da üretim yöntemleri de literatürde yer almaktadır. Topal (2010) araştırmasında farklı üretim yöntemleri kullanarak baryum hekzaferrit malzemesinin manyetik özelliklerdeki değişimlerini incelemiştir.

Bu çalışmada, Fe/Ba oranı 12 alınarak üretilmiş olan baryum hekzaferrit tozlarına B_2O_3 katkısı farklı oranlarda eklenerek elde edilen $BaFe_{12}O_{19}/B_2O_3$ kompozit malzemesinin sinterleme sonrasındaki manyetik özellikleri ve faz yapıları incelenmiştir. M-Tipi hekzaferrit kalıcı mıknatıslar özellikle yüksek Curie sıcaklığı (T_c), kristal anizotropisi, zorlayıcı alan değeri, mükemmel kimyasal kararlılığa ve korozyon direncine sahiptir (Nazia vd. 2017). Bu üstün özellikleri sebebiyle yaygın olarak kullanılan bu mıknatısların manyetik özelliklerinin geliştirilerek endüstriyel olarak kullanımının daha da genişletilmesi amacıyla literatürde yer alan araştırmalardan farklı olarak $BaFe_{12}O_{19}/B_2O_3$ kompozit kalıcı mıknatısları üretilmiş ve hem yapısal hem de manyetik özellikleri incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

(BaFe₁₂O₁₉)_{1-x}(B₂O₃)_x (x = 0, 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.1) kompozisyonlarına sahip baryum hekzaferrit örnekleri toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiştir. Başlangıç malzemelerinden BaFe₁₂O₁₉ tozlarının üretimi için Fe₂O₃, BaCO₃ tozlarına Fe/Ba oranı 12 olacak şekilde hava atmosferinde 150 rpm dönme hızına sahip bilyeli değirmende kuru ortamda 3 saat süreyle karıştırma işleminin ardından 1200 °C de hava atmosferinde 2 saat ısıtma işlemi uygulanmıştır. Tozların karıştırılmasında 10 mm çapında sertleştirilmiş paslanmaz çelik bilyeler ve 150 ml hacminde sertleştirilmiş çelik kavanoz kullanılmış, bilye/toz oranı 10 olarak belirlenmiştir. (BaFe₁₂O₁₉)_{1-x}(B₂O₃)_x kompozit malzemesinin üretimi için elde edilen BaFe₁₂O₁₉ ve B₂O₃ tozları belirlenen oranlarda (x = 0, 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.1) alınarak yukarıda bahsedilen şartlarda karıştırma işlemleri aynı koşullarda tekrar uygulanmıştır. Daha sonra karışım tozları 10 mm çapında ve yaklaşık 2 mm yükseklikteki boyutlarda 10 MPa basınçta preslenmiş ve 800 °C de 2 saat hava atmosferinde sinterlenmiştir. Fırının ısıtma hızı 10 °C/dak 'dır. Sinterlenen örneklerin nihai yoğunluklarının hesaplanmasında boyutları dijital kumpasla üç kez ölçülerek ve hassas terazide üç kez tartılarak ortalamaları alınmıştır. Mikroyapıdaki fazlar X-ışını difraksiyonu ile 2θ açısı 5 – 80 ° alınarak belirlenmiş, X ışını kaynağı olarak Cu Kα kullanılmıştır. XRD analizi için numuneler önce kırılmış ve havada toz haline getirilmiştir. Örneklerin M-H histerezis eğrileri ve manyetizasyon özellikleri Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) ile oda sıcaklığında +/- 12 kOe manyetik alan şiddeti uygulanarak ölçülmüştür.

3. Bulgular

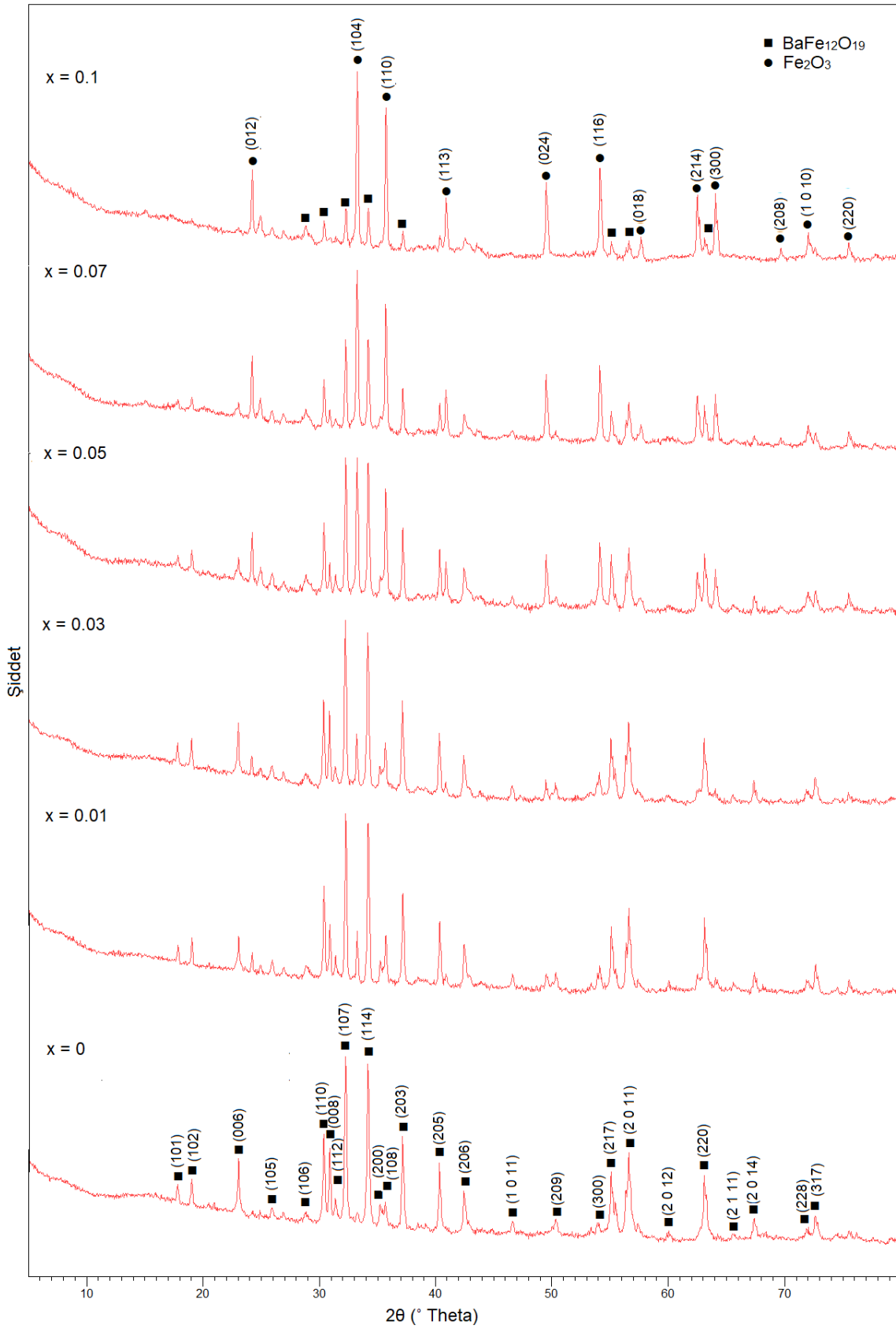
Şekil 1'de verilen (BaFe₁₂O₁₉)_{1-x}(B₂O₃)_x (x = 0, 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.1) örneklerinin XRD difraksiyon sonuçlarına göre katkısız (x=0) numunenin XRD paterninde tespit edilen sadece kalıcı manyetik BaFe₁₂O₁₉ (JCPDS Patern no: 84-0757) fazına ait piklerin yansıma düzlemleri (101), (102), (006), (105), (106), (110), (008), (112), (107), (114), (200) (108), (203), (205), (206), (1 0 11), (209), (300), (217), (2011), (2 0 12), (220) (2 1 11), (2 0 14), (228), (317) ve bu düzlemlere karşılık gelen 2θ açıları sırasıyla 17.8064 °, 19.0249 °, 23.0353 °, 25.8950 °, 28.8388 °, 30.3496 °, 30.8560 °, 31.3418 °, 32.2218 °, 34.1489 °, 35.1904 °, 35.6373 °, 37.1152 °, 40.3516 °, 42.4571 °, 46.6071 °, 50.3007 °, 53.8832 °, 55.0881 °, 56.6155 °, 60.0383 °, 63.0995 °, 65.5691 °, 67.3606 °, 71.8788 ° ve 72.6286 ° olarak ölçülmüştür. XRD analizinde B₂O₃ ilavesi ile birlikte x = 0.01 için BaFe₁₂O₁₉ 'in yanı sıra α-Fe₂O₃ (JCPDS Patern no: 89-0598) fazına ait pikler tespit edilmiştir. Bu piklerin yansıma düzlemleri (012), (104), (110), (024), (116), (214) ve (300) ve bu düzlemlere karşılık gelen 2θ açıları 24.2098 °, 33.2148 °, 35.6809 °, 49.4927 °, 54.1338 °, 62.4986 ° ve 64.0577 ° olarak ölçülmüştür. B₂O₃ oranının artmasıyla birlikte özellikle x ≥ 0.05 olduğunda α-Fe₂O₃ fazına ait piklerin şiddetleri önemli ölçüde yükselmektedir, katkı oranı daha da artırıldığında (x ≥ 0.07) mikroyapıdaki ana faz hematit (α-Fe₂O₃) ve x = 0.1 olduğunda BaFe₁₂O₁₉ fazına ait piklerin şiddetinin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Bu durum aynı zamanda mikroyapıda α-Fe₂O₃ miktarının da arttığını göstermektedir. Tablo 1 de yer alan hekzagonal kafes parametreleri "a", "c" ve birim hücre hacmi (V_{hücre}) aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır (Ali vd., 2013).

$$\frac{1}{d^2} = \frac{(h^2 + hk + k^2)}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad 1$$

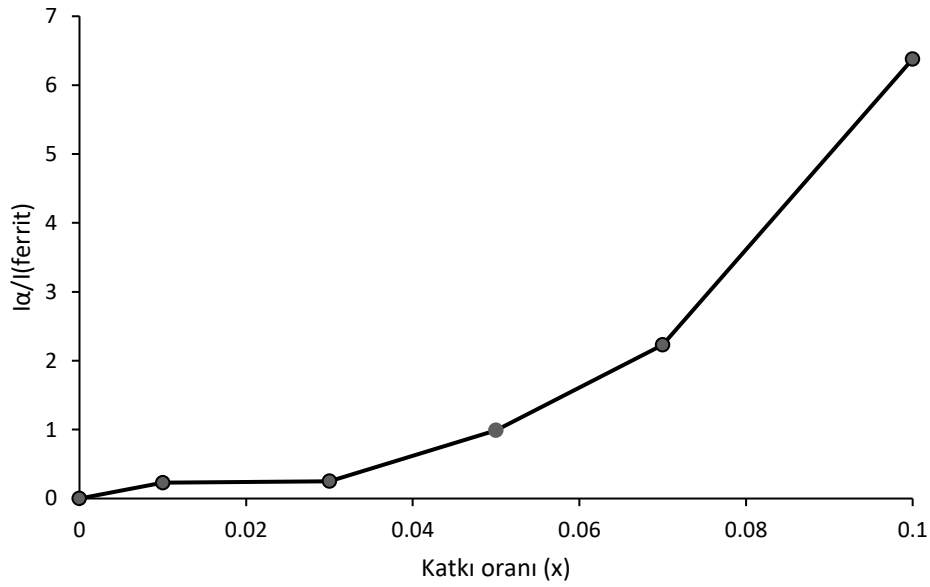
$$V_{hücre} = 0.8666a^2c \quad 2$$

BaFe₁₂O₁₉ fazının birim hücre parametrelerinin hesaplanmasında x = 0.1 için XRD paterninde bu faza ait pik şiddetleri önemli ölçüde azaldığı için a, c ve V_{hücre} hesaplanamamıştır. Tablo 1 'de verilen kafes parametrelerinden "a" için önemli bir değişme olmazken "c" ve birim hücre hacmi (V_{hücre}) azalma ve artma görülmüştür. Kafes parametresinde ve birim hücredeki azalmanın sebebi B³⁺ iyonlarının hekzagonal kafeste daha büyük iyonik çapa sahip olan Fe³⁺ konumlarına yerleşmesidir, diğer taraftan B₂O₃ oranı x = 0.03 olduğunda "c" ve V_{hücre} 'nin latisteki çarpılmadan dolayı arttığı düşünülmektedir. Elde ettiğimiz bu sonuçlar konuyla ilgili literatürde yer alan araştırmalarla uyumludur. Thongmee vd., (2003) tarafından yapılan Mössbauer çalışmasında B³⁺ katkı iyonlarının magnetoblumbit kristal yapı içerisinde Fe³⁺ iyonundan daha küçük boyutta olmasından dolayı tetrahedral 4f1 konumlarını tercih ettiği yer almaktadır. Ram (1989) tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise tetrahedral konumları tercih eden B³⁺ iyonunun boyutunun küçük olması ve çözünürlüğünün düşük olmasından dolayı B₂O₃ katkı miktarının artmasıyla birlikte hekzagonal birim hücrede çarpılmanın (distorsiyon) meydana geldiği yer almaktadır.

Şekil 2'de X- ışını difraksiyonunda, α-Fe₂O₃ fazının (104) düzlemine ait ana pikin bağıl şiddetinin (I_a), BaFe₁₂O₁₉ fazının (107) düzleminden yansıma sonundaki ana pikin bağıl şiddetine (I_{ferrit}) oranının B₂O₃ miktarına (0 ≤ x ≤ 0.1) göre değişimi verilmiştir. Bu noktada B₂O₃ oranı x = 0.05 olduğunda BaFe₁₂O₁₉ fazının (107) düzleminden yansıyan ve α-Fe₂O₃ fazının (104) düzlemine ait ana piklerin bağıl şiddetleri arasındaki fark sadece %2 'dir, burada mikroyapıda bu iki fazın miktarlarının birbirine olduğu söylenebilir. I_a/I_{ferrit} oranı x = 0.01 için 0.23, x = 0.03 olduğunda çok küçük bir artışla 0.25 'e yükselirken x ≥ 0.05 olduğunda giderek daha büyük bir artış görülmektedir.



Şekil 1. $(\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19})_{1-x}(\text{B}_2\text{O}_3)_x$ örneklerinin X-Işını Difraksiyonu analiz sonuçları.



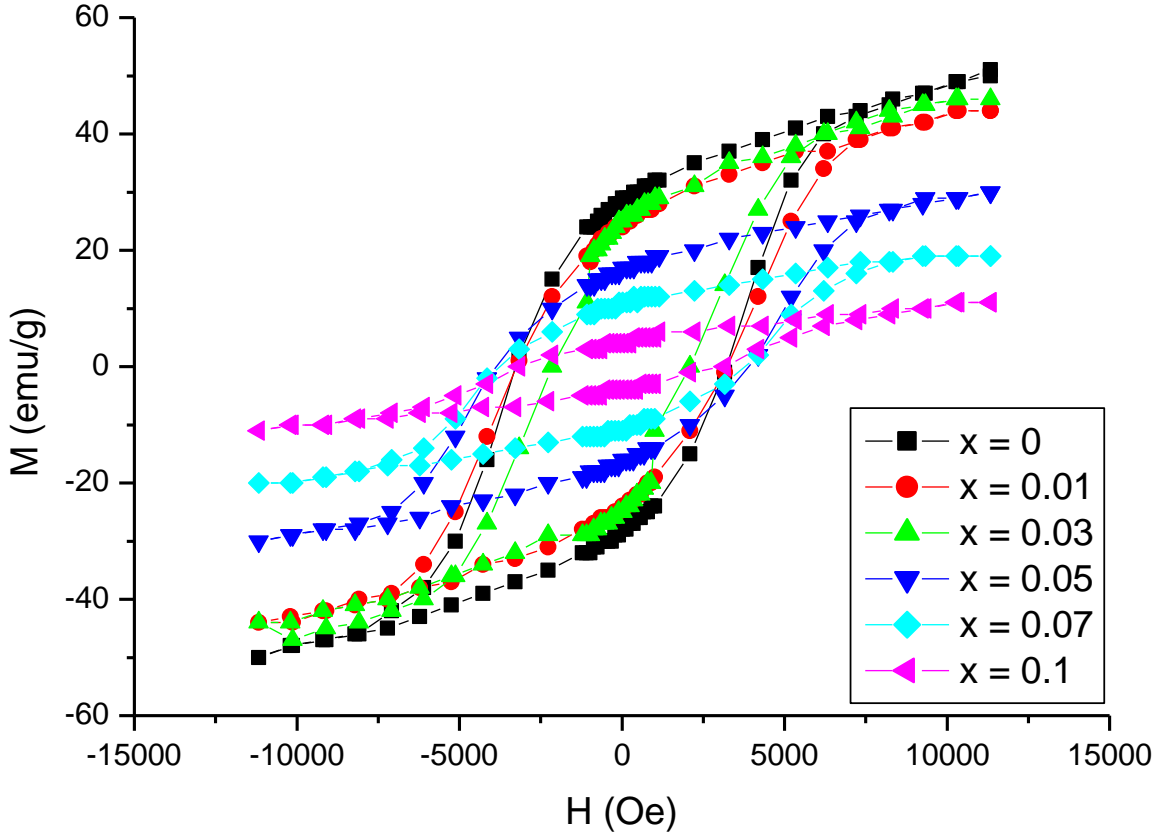
Şekil 2. $(\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19})_{1-x}(\text{B}_2\text{O}_3)_x$ örneklerinin bağıl şiddet oranları.

Şekil 3 'de $(\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19})/(\text{B}_2\text{O}_3)$ kompozit örneklerine ait M – H Histerezis eğrileri verilmektedir. B_2O_3 oranının artmasıyla birlikte doyum manyetizasyonu (M_s) ve kalıcı manyetizasyon (M_r) giderek azalırken zorlayıcı alan (H_c) yükselmekte ve histerezis eğrileri bir miktar genişlemektedir.

Elde edilen manyetizasyon değerlerindeki azalmanın birkaç sebebi olduğu düşünülmektedir, bunlardan birincisi XRD analizinde görüldüğü gibi katkı ile birlikte $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ fazının yanı sıra oluşan ve çok düşük doyum manyetizasyon (M_s) ve zorlayıcı alan (H_c) değerine sahip hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) fazıdır. Hematit fazının yoğunluğu 5.26 g/cm^3 olup manyetik özellikleri partikül boyutuna göre değişmektedir, Curie sıcaklığı (T_c) 956 K, oda sıcaklığındaki doyum manyetizasyonu 0.3 emu/g ve anizotropi sabiti $1 - 6 \times 10^4 \text{ J/m}^3$ gibi çok düşük değerlere sahiptir (Cornell & Schwerthman, 2003). Islama vd., (2012) tarafından yapılan çalışmada yaklaşık 50-60 nm arasında tane boyutlarına sahip Fe_2O_3 fazının M_s değeri 1.6 emu/g olarak bulunmuştur. Karade vd., (2019) ise araştırmalarında ortalama 5 nm tane boyutlarındaki Fe_2O_3 partikülleri için M_s ve H_c değerlerini sırasıyla 8.5 emu/g ve 19 Oe olarak belirtmişlerdir. Hematitin ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) bu zayıf manyetik özellikleri nedeniyle B_2O_3 katkısıyla birlikte mikroyapıda oluşması örneklerin doyum manyetizasyonu (M_s) ve kalıcı mıknatıslanma (M_r) değerlerinin düşmesine sebep olmuştur. Çünkü mikroyapıdaki Fe_2O_3 miktarının artmasıyla kalıcı manyetik $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ taneleri arasındaki değiş-tokuş etkileşimi giderek zayıflamakta ve malzemenin M_r ve M_s değerlerinde azalma olmaktadır. Ram (2002) tarafından yapılan çalışmada ise B_2O_3 katkısı baryum hekzaferritin doyum manyetizasyon (M_s) değerini % 13 civarında arttırırken zorlayıcı alan (H_c) 1 kOe 'e kadar düşürmüştür. Burada manyetizasyonun artış sebebi B^{3+} iyonlarının magnetoplumbit birim hücrede tetrahedral 4f2 konumlarındaki Fe^{3+} iyonlarının yerlerini işgal etmesi ve böylece malzeme içindeki toplam manyetizasyon değerini yükseltmesinden dolayıdır. Fakat bizim çalışmamızda aynı zamanda B_2O_3 katkısıyla mikroyapıda oluşan ve düşük manyetizasyon değerine sahip olan Fe_2O_3 fazı M_s ve M_r değerlerinin düşmesine neden olmuştur.

Manyetizasyon değerlerindeki azalmanın ikinci sebebi ise B_2O_3 miktarındaki artışla katkılı numunelerin yoğunluğunun giderek azalmasıdır, burada B_2O_3 oranının yükselmesiyle birlikte mikroyapıdaki miktarı giderek artan hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) fazının malzemenin sinterlenme davranışını olumsuz etkilediği düşünülmektedir. Bu durum manyetizasyon değerlerinde azalmaya neden olur, çünkü manyetik taneler arasındaki boşluklar manyetizasyona ters yöndeki demanyetizasyon alanına ve toplam manyetizasyonda azalmaya sebep olmaktadır (Cullity & Graham, 2009).

Katkılı kompozit malzemelerin zorlayıcı alan (H_c) değerlerindeki yükselmenin başlıca sebebinin $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ taneleri arasında ferromanyetik özellikleri çok zayıf olan Fe_2O_3 fazının bulunmasından dolayı manyetik değiş-dokuş etkileşiminin azalmasının olduğu düşünülmektedir. Çünkü manyetik taneler arasında ferromanyetik olmayan veya düşük manyetizasyon değerine sahip bir fazın manyetik domenlerin dış manyetik alan şiddeti altında yönlendirmelerini zorlaştırması beklenir.



Şekil 3. $(\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19})_{1-x}(\text{B}_2\text{O}_3)_x$ örneklerine ait M – H Histerezis eğrileri.

Tablo 1 'de üretilen katkısız ve $(\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19})/(\text{B}_2\text{O}_3)$ kompozit örneklerin manyetik özellikleri ve yoğunluk değerleri verilmiştir. Manyetizasyon ölçümleri sonucunda saf baryum hekzaferrit için zorlayıcı alan (H_c) 3244 Oe, doyum manyetizasyonu (M_s) ve kalıcı manyetizasyon (M_r) değerleri sırasıyla 50.7 emu/g ve 28.5 emu/g olarak elde edilmiştir. M_r/M_s yaklaşık 0.50 civarından olması manyetik tanelerin rastgele yönlenmiş olduğunu göstermektedir.

B_2O_3 miktarına göre H_c değişkenlik göstermektedir, M_s ve M_r değerlerindeki genel eğilim ise azalma yönündedir ve $x = 0.1$ olduğunda M_s ve M_r sırasıyla 11.02 emu/g ve 4.18 emu/g olan en düşük değerlere ulaşırken H_c 2981 Oe 'dir. Zorlayıcı alan değerindeki bu düşmenin sebebi üretilen ferrit malzemesinin birim hacmindeki kalıcı (sert) manyetik $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ miktarındaki azalma olabilir. Manyetizasyon ölçümleri sonucunda saf baryum hekzaferrit için doyum manyetizasyonu (M_s) ve kalıcı manyetizasyon (M_r) değerleri sırasıyla 50.7 emu/g ve 28.5 emu/g ve zorlayıcı alan (H_c) 3244 Oe olarak elde edilmiştir. Kompozit baryum hekzaferrit örneklerinde $x = 0.05$ olduğunda en yüksek H_c % 17.5 artarak 3812 Oe olarak elde edilirken, M_s ve M_r değerlerinde sert bir düşme olmuştur, M_s yaklaşık % 40 azalarak 29.97 emu/g ve M_r % 35 civarında düşerek 16.59 emu/g olarak elde edilirken M_r/M_s oranı 0.55 'e yükselmiştir. Belirtilen manyetizasyon değerleri Topal (2012) tarafından yapılan çalışmada B_2O_3 oranı % 5 alındığında kaydedilen sonuçlara oldukça yakındır, ancak aynı çalışmada H_c değeri 3450 Oe olarak yer alırken, elde ettiğimiz sonuçlarda zorlayıcı alan daha yüksek bir değer olan 3812 Oe 'e yükselmiştir.

Zorlayıcı alan (H_c) değeri, kristal anizotropisi, tane boyutu, impürite fazların miktarı ve manyetik özellikleri gibi parametrelere bağlıdır. Bizim çalışmamızda, B_2O_3 oranlarına göre manyetik özelliklerdeki değişimin mikroyapıda XRD analizi sonucu tespit edilen ve zayıf manyetik özelliklere sahip olan hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) fazının miktarına bağlı olarak değişmektedir.

Tablo 1. (BaFe₁₂O₁₉)_{1-x}(B₂O₃)_x örneklerinin yoğunluk (ρ) ve manyetik özellikleri.

Örnek	ρ (g/cm ³)	a (Å)	c (Å)	$V_{\text{hücre}}$ (Å ³)	H_c (Oe)	M_s (emu/g)	M_r (emu/g)	M_r/M_s
BaFe ₁₂ O ₁₉	3.61	5.8854	23.1648	695.343	3244	50.70	25.50	0.50
(BaFe ₁₂ O ₁₉) _{0.99} (B ₂ O ₃) _{0.01}	3.59	5.8816	23.1544	694.134	3285	43.88	24.30	0.55
(BaFe ₁₂ O ₁₉) _{0.97} (B ₂ O ₃) _{0.03}	3.46	5.8888	23.1827	696.685	3175	46.03	25.38	0.55
(BaFe ₁₂ O ₁₉) _{0.95} (B ₂ O ₃) _{0.05}	3.40	5.8823	23.1698	694.761	3812	29.97	16.59	0.55
(BaFe ₁₂ O ₁₉) _{0.93} (B ₂ O ₃) _{0.07}	3.33	5.8814	23.1658	694.283	3676	19.34	10.86	0.56
(BaFe ₁₂ O ₁₉) _{0.90} (B ₂ O ₃) _{0.1}	3.27				2981	11.02	4.28	0.39

Tablo 1 'de verilen (BaFe₁₂O₁₉)_{1-x}(B₂O₃)_x ($0 \leq x \leq 0.1$) örneklerinin yoğunluk değerleri örneklerin geometrik boyutlarından hesaplanarak elde edilmiştir. Katkısız örneğin yoğunluk değeri 3.61 g/cm³ iken B₂O₃ katkısı ile birlikte $x = 0.01$ olduğunda bir miktar azalmayla birlikte 3.59 g/cm³ olarak hesaplanmıştır, katkı oranlarının artmasıyla azalma giderek devam ederek $x = 0.1$ için olan 3.27 g/cm³'e düşmüştür.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, (BaFe₁₂O₁₉)/(B₂O₃) kompozit kalıcı mıknatısları toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiştir. Örneklerin XRD analizinde, B₂O₃ katkısı ile birlikte BaFe₁₂O₁₉ fazının yanı sıra hematit (α -Fe₂O₃) fazı tespit edilmiş ve katkı miktarı arttıkça bu faza ait piklerin şiddetlerinin giderek arttığı görülmüştür. B₂O₃ oranı $x \geq 0.07$ olduğunda ise ana faz hematittir (α -Fe₂O₃). Burada B₂O₃ katkısının iki farklı etkisinden söz edebiliriz. Bunlardan birincisi B³⁺ iyonunun kalıcı ferromanyetik BaFe₁₂O₁₉ hekzagonal kafesin tetrahedral 4f1 konumundaki Fe³⁺ iyonlarının yerlerini işgal etmesi ile manyetizasyon değerlerindeki yükselmedir. Kafes parametresi "C" nin ve birim hücre hacmi V_{hacim} 'nin azalması B³⁺ iyonlarının kristal yapıdaki Fe³⁺ iyonlarının konumlarını işgal etmesi olarak yorumlanabilir. Diğer bir etki ise katkı iyonlarının boyutunun küçük olmasından dolayı yapıya girdiğinde hekzaferrit birim hücrede meydana gelebilecek çarpılma ve iç gerilmeler nedeniyle kimyasal kararlılığın bozulması sonucu mikroyapıda zayıf manyetik özelliklere sahip hematit fazının oluşmasıdır.

Manyetizasyon ölçümlerinde katkısız baryum hekzaferrit için doyum manyetizasyonu (M_s) ve kalıcı manyetizasyon (M_r) değerleri sırasıyla 50.7 emu/g ve 28.5 emu/g, zorlayıcı alan (H_c) 3244 Oe olarak elde edilmiştir. B₂O₃ katkısıyla birlikte M_s ve M_r değerleri düşmeye başlamış, kalıcı manyetik malzeme için önemli olan en yüksek H_c değeri $x = 0.05$ için 3812 Oe olarak elde edilmiştir.

Referanslar

- Ali, I., Islam, M.U., Awan, M.S., Ahmad, M., Ashiq, M. N. & Naseem, S. (2013). Effect of Tb³⁺ substitution on the structural and magnetic properties of M-type hexaferrites synthesized by sol-gel auto-combustion technique, *Journal of Alloys and Compounds*, 550, 564–572. doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.10.121
- Ashiq, M. N., Shakoob, S., Haq, M. N., Warsi, M. F., Ali, I. & Shakir, I. (2015). Structural, electrical, dielectric and magnetic properties of Gd-Sn substituted Sr-hexaferrite synthesized by sol-gel combustion method, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 374, 173–178. doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.08.020
- Awadallaha, A., Mahmooda, S. H., Maswadeha, Y., Bsoulb, I., Awawdeh, M., Mohaidatc, Q. I. & Juwharia, H. (2016). Structural, magnetic, and Mössbauer spectroscopy of Cu substituted M-type hexaferrites, *Materials Research Bulletin*, 74, 192–201. doi.org/10.1016/j.materresbull.2015.10.034
- Awawdeh, M., Bsoul, I. & Mahmood, S.H. (2014). Magnetic properties and Mössbauer spectroscopy on Ga, Al, and Cr substituted hexaferrites, *Journal of Alloys and Compounds*, 585, 465-473. doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.09.174
- Chen, N., Yang, K. & Gu, M. (2010). Microwave absorption properties of La-substituted M-type strontium ferrites, *Journal of Alloys and Compounds*, 490, 609–612. doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.10.116
- Cornell, R. M. & Schwerthman, U. (2003). *The Iron Oxides*, Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA.
- Cullity, B. D. & Graham C. D. (2009). *Introduction to Magnetic Materials*, New Jersey, John Wiley&Sons.
- Doroftei, C., Rezlescu, E., Popa, P. D. & Rezlescu, N. (2006). Heat-treatment influence on the microstructure and magnetic properties of rare-earth substituted SrFe₁₂O₁₉. *Cryst. Res. Technol.*, 41(11), 1112 – 1119. doi.org/10.1002/crat.200610731
- Goldman, A. (2006). *Modern Ferrite Technology*, New York, 2nd Edition, Springer.

- Islama, M. S., Kurawaki, J., Kusumotoa, Y., Abdulla-Al-Mamuna, M. & Mukhlis, M. Z. B. (2012). Hydrothermal Novel Synthesis of Neck-structured Hyperthermia-suitable Magnetic (Fe_3O_4 , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ and $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) Nanoparticles, *J. Sci. Res.*, 4 (1), 99-107. doi.org/10.3329/jsr.v4i1.8727
- Kang, Y. M., Kwona, Y. H., Kim, M. H. & Lee, D. Y. (2015). Enhancement of magnetic properties in Mn–Zn substituted M-type Sr-hexaferrites, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 382, 10–14. doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.01.048
- Karade, V.C., Parit, S.B., Dawkar, V.V., Devan, R.S., Choudhary, R.J., Kedge, V.V., Pawar, N.V., Kim, J.H. & Chougale, A.D. (2019). A green approach for the synthesis of $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanoparticles from Gardenia resinifera plant and its In vitro hyperthermia application, *Heliyon*, 5, e02044. doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02044
- Khan, H. M., Islam, M.U., Xu, Y., Iqbal, M. A. & Ali, I. (2014). Structural and magnetic Properties of TbZn-substituted calcium barium M-type nano-structured hexa-ferrites, *Journal of Alloys and Compounds*, 589, 258–262. doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.11.107
- Liu, Q., Liu, Y., Wu, C., Yu, W., Jie, L., Liwen, G. & Zhang, H. (2017). Investigation on Zn-Sn co-substituted M-type hexaferrite for microwave applications, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 444, 421-425. doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.08.007
- Meng, X. & Ji, Y. (2013). Effect of chemical composition and heat treatment condition on microstructure and magnetic properties of nanocrystalline $\text{BaDy}_x\text{Fe}_{12-x}\text{O}_{19}$ ($x = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$) microfibrils, *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, 67, 18–28. doi:10.1007/s10971-013-3046-1
- Neupane, D., Wang, L., Adhikari, H., Alam, J. & Mishra, S.R. (2017). Synthesis and characterization of co-doped $\text{SrFe}_{12-x}(\text{DyAl})_x\text{O}_{19}$ Hexaferrite, *Journal of Alloys and Compounds* 701, 138-146. doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.088
- Topal, U. (2010). Evolution of Structural and Magnetic Properties of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ with B_2O_3 Addition, *Chin. Phys. Lett.*, 27(11), 117503. doi: 10.1088/0256-307X/27/11/117503
- Topal, U. (2012). Towards Further Improvements of the Magnetization Parameters of B_2O_3 -Doped $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ Particles: Etching with Hydrochloric Acid, *J. Supercond. Nov. Magn.*, 25, 1485–1488. doi.org/10.1007/s10948-012-1486-4
- Ram, S. (1989). Crystallisation of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ hexagonal ferrite with an aid of B_2O_3 and the effects on microstructure and magnetic properties useful for permanent magnets and magnetic recording devices, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 82(1), 129-150. doi.org/10.1016/0304-8853(89)90073-5
- Skomski, R. & Coey, J.M.D. (1999). *Permanent Magnetism*, Bristol, Institute of Physics Publishing.
- Thongmee, S., Winotai, P., and Tang, M. (2003). Boron Site Preference in B-Doped Barium Hexaferrite, *ScienceAsia* 29, 51-55. doi: 10.2306/scienceasia1513-1874.2003.29.051
- Vinnik, D.A., Semisalova, A.S., Mashkovtseva, L.S., Yakushechkina, A.K., Nemrava, S. & Gudkova, S.A. Zhrebtsov, N.S. Perov, L.I. Isaenko, Niewa, R. (2015). Growth, structural and magnetic characterization of Zn-substituted barium hexaferrite single crystals, *Materials Chemistry and Physics*, 163, 416-420. doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.07.059
- Yang, Y., Huang, D., Wang, F. & Shao, J. (2019). An investigation on microstructural, spectral and magnetic properties of Pr–Cu double-substituted M-type Ba–Sr hexaferrites, *Chinese Journal of Physics*, 57, 250–260. doi.org/10.1016/j.cjph.2018.11.012
- Yasmin, N., Mirza, M., Muhammadd, S., Zahid, M., Ahmad, M., Awan, M.S. & Muhammada, A. (2018). Influence of samarium substitution on the structural and magnetic properties of M-type hexagonal ferrites, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 446, 276–281. doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.09.005
- Yasmina, N., Abdulsatara, S., Hashim, M., Zahida, M., Gillania, S. F., Kalsoomb, A., Ashiq, M. N., Inama, I., Safdard, M. & Mirzaa, M. (2019). Structural and magnetic studies of Ce-Mn doped M-type $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ hexagonal ferrites by sol-gel auto-combustion method, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 473, 464–469. doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.10.076
- Zhou, Z., Wang, Z., Wang, X., Wang, X., Zhang J., Dou, F., Jin, M. & Xu, J. (2014). Differences in the structure and magnetic properties of $\text{Sr}_{1-x}\text{RE}_x\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ (RE: Pr and Dy) ferrites by microwave-assisted synthesis method, *Journal of Alloys and Compounds*, 610, 264-270. doi: 10.1016/j.jallcom.2014.04.217



Adaptif Sinyalize Kavşaklar için Derin Öğrenme Yaklaşımı ile Gecikme Modelleri Geliştirilmesi

Development of Delay Models with a Deep Learning Approach for Adaptive Signalized Intersections

Berk Bayraktar¹, Erdem Doğan²

¹*Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Toplu Konut İdaresi Başkanlığı, Ankara, TÜRKİYE*

²*Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 71451 Kırıkkale, TÜRKİYE*

Başvuru/Received: 19/12/2020

Kabul / Accepted: 10/02/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 13/02/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Sinyalize kavşak yönetim sistemleri, haberleşme ve detektör sistemlerindeki gelişmeler sayesinde daha verimli hale gelmiştir. Özellikle Adaptif Sinyal Yönetim Sistemleri (ASYS), kavşakları değişken trafik parametrelerine uyum sağlayacak biçimde planlamaktadır. Fakat sinyalize kavşakların etkinliğinin ölçülmesi için geliştirilen geçmiş yaklaşımlar, devre süresi ve faz düzeni gibi denetim parametrelerinin sürekli değişimine uyumlu değildir. Bu çalışmada, derin öğrenme yaklaşımı kullanılarak ASYS ile yönetilen kavşaklar için bir gecikme tahmin modeli (DÖM) geliştirilmiştir. Performanslar, yapay sinir ağı (YSA) modelleri ve analitik modellerle karşılaştırılarak DÖM'ün verimliliği analiz edilmiştir. Ayrıca, DÖM ve YSA modelleri, farklı girdi değişkenleri ile eğitilerek performansları araştırılmıştır. Modellemeler için kullanılan veriler Kırıkkale ili sınırları içindeki ASYS ile yönetilen bir kavşaktan, gözlem yapılarak toplanmıştır. Bu gözlemler araç türlerine göre yapılmış ve toplam 487 adet devrede 6331 adet taşıtın gecikme gözlemi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, DÖM modelinin, gerçek değerleri YSA modelinden yaklaşık 2 kat, analitik modellerden yaklaşık 5 kat daha düşük hata yüzdeleri ile tahmin ettiğini göstermiştir. Bu çalışma, derin öğrenme yaklaşımının, değişken zamanlama ile çalışan sinyalize kavşaklar için etkin bir performans ölçüm modeli olduğunu ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler

“Gecikme modeli, Derin Öğrenme, Adaptif Sinyalizasyon Sistemleri”

Abstract

Signalized intersection management systems have become more efficient with the help of developments in communication and detector systems. Especially, Adaptive Signal Management Systems (ASMS) have planned intersections to adapt to variable traffic parameters. However, previous approaches developed to measure the efficiency of signalized intersections are not compatible with the continuous change of control parameters such as cycle length and phase plans. In this study, a delay estimation model (DÖM) has been developed for intersections managed with ASMS using the deep learning approach. The efficiency of the DÖM has been analyzed by comparing the performances with artificial neural network (ANN) models and analytical models. In addition, DÖM and ANN models were trained with different input variables and their performances were investigated. The data used for modeling were collected from the intersection managed by ASMS in Kırıkkale province by making observations. These observations were made according to vehicle types and delay observations of 6331 vehicles in a total of 487 cycles were made. Analysis results showed that the DÖM model predicts the actual delays with error percentages approximately 2 times lower than the ANN model, and approximately 5 times lower than the analytical models. This study revealed that DÖM is an effective performance measurement model for signalized intersections operating with variable timing.

Key Words

“Delay model, Deep Learning, Adaptive Signalization Systems”

1. Giriş

Son yıllarda artan nüfus ve kentleşme, ulaştırma sektörünü doğrudan etkilemektedir. Bu etki yolculuk talebi ve taşıt sayısında artışa yol açmaktadır. Trafik yoğunluğunun artması ise Ön Zamanlı Sinyal Sisteminin (ÖSS) kavşaklarda yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla yerel yönetimler, trafikte karşılaşılan sorunlara ileri teknolojik uygulamalar kullanarak çözümler üretmektedir. Birçok şehirde bulunan trafik kontrol merkezlerinde, kavşaklardan elde edilen verilerin işlenerek sinyalizasyon sisteminin yönetilmesini sağlayan yapılar bulunmaktadır. Bu yapılar adaptif kavşak kontrol sistemleri olarak adlandırılmakta olup, 2005 yılından itibaren ülkemizde akıllı ulaşım sistemlerinin bir parçası olarak kullanılmaktadır (Katanalp, 2018). Bu nedenle yerel yönetimler Adaptif Sinyal Yönetim Sistemlerini (ASYS) daha fazla tercih etmekte olup, gelecek yıllarda da ASYS'lerin daha yaygın kullanılması beklenmektedir. Diğer taraftan, sinyalizasyon kavşaklarının performansının ölçülmesinde kullanılan ölçüt olan gecikme değerini tahmin etmek için geliştirilmiş Webster, HCM (Highway Capacity Manual), Avustralya (Akçelik) gibi analitik modeller, ÖSS için genelde tatmin edici sonuçlar üretmeyi başarabilmektedir. Ancak ASYS için gecikme ölçütünü istenilen isabette tahmin edebilen modellere ihtiyaç duyulmaktadır.

Saha ölçümleri, analitik yöntemler, simülasyon programları ve yapay zeka yöntemleri kullanılarak sinyalizasyon kavşaklarında gecikme tahmini yapılabilmektedir. Gerçek gecikme değerleri sadece saha ölçümleri yapılarak tespit edilebilmekte olup, bu ölçümlerin yapılması oldukça zahmetli, zor ve zaman alan işlemlerdir. Çünkü bu işlemleri gerçekleştirmek için teknolojik aletlere ve insan gücüne gereksinim duyulmaktadır. Sinyalizasyon kavşaklarındaki trafik hacimlerinin gün geçtikçe artması kavşakların performansının arazi ölçümleri ile belirlenmesini güçleştirmektedir. Bu nedenle saha analizlerinin daha emniyetli, ucuz ve hızlı bir şekilde yapılması ve farklı trafik durumlarının kolayca karşılaştırılması amacıyla simülasyon teknikleri geliştirilmiştir (Akbaş, 2020). Simülasyon programları ile sinyalizasyon kavşaklarının benzetimi yapılarak, ulaşım performansları ve kavşağın hizmet düzeyi kolayca etüt edilebilmektedir. Trafik mühendisliğinde kullanılan en popüler trafik simülasyon programları CORSIM ve VISSIM'dir. Ancak kavşağın karakteristik özelliklerinin tümüyle temsil edilmemesi, modelin fazla detaylandırılması, performans ölçümünde yanlış kıstasların kullanılması ve modelin geçerliliğinin sınanmaması nedeniyle simülasyon modelleri gerçek sonuçlardan sapabilmektedir (Ocakdan, 2010). Bu nedenle analitik modeller ve simülasyon programları ile ortaya çıkan eksiklikleri gidermek amacıyla yapay zeka yöntemleri ile oluşturulmuş ve gecikme tahmini ortaya koyan modellerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

ASYS'nin ÖSS'ye göre kavşak performansını arttırarak gecikmeleri ve seyahat süresini azalttığı yapılan bilimsel çalışmalarla kanıtlanmış (Tektaş vd., 2002) olmasına rağmen ASYS ile kontrol edilen kavşaklar için geliştirilmiş gecikme modelleri oldukça az sayıdadır. Bu nedenle bu çalışmada, analitik modeller (HCM ve Avustralya) ve yapay zeka modelleri (YSA ve DÖM) kullanılarak, ASYS ile yönetilen izole sinyalizasyon kavşaklarındaki taşıt gecikmelerini doğru olarak tahmin eden modeller geliştirilmiştir. Kırıkkale Sanayi kavşağından elde edilen devre bazlı ortalama taşıt gecikmeleri ana kol ve tali kol için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Modellerin performansları kavşaktan elde edilen gerçek gecikme değerleri ile karşılaştırılarak, modellerin üstün ve zayıf yönleri ortaya konulmaya çalışılmıştır. Modellerin tahmin sonuçları ana kol ve tali kol için ayrı ayrı ortaya konmuştur. Yapay zeka ile geliştirilen modellerde iki farklı veri kümesi kullanılmıştır. İlk veri kümesinde (GD-1), kırmızı ve sarı süre, yeşil süre, devre süresi, yeşil sürenin devre süresine oranı, toplam taşıt sayısı, ağır ticari taşıt sayısı ve ağır ticari taşıt sayısının toplam taşıt sayısına oranı veri girişinde kullanılmıştır. İkinci veri kümesinde (GD-2) ise kırmızı ve sarı süre, toplam taşıt sayısı, ağır ticari taşıt sayısı veri girişinde kullanılmıştır. Tüm modellerde ana kol ve tali kol için veri setleri eğitim ve test verisi olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Veriler üzerinde 4-katlı çapraz doğrulama (ÇD) tekniği uygulanmıştır. Modellerin değerlendirilmesinde ortalama karesel hata (OKH), Ortalama Karesel Hataların Karekökü (OKHK) ve Ortalama Mutlak Yüzde Hata (OMYH) performans ölçütleri olarak seçilmiştir. Bu çalışmadaki önemli bir kısıt gecikme değerlerinin bir kavşaktan elde edilmiş olmasıdır. Özellikle gecikme verisinin kavşaklardan elde edilmesi zor bir süreç olup, bununla ilgili yerleşmiş bir veri kaynağı da mevcut değildir. Bu nedenle, çalışmadaki incelenen her bir taşıta ait gecikme verileri gözlem ve hesaplamalar sonucunda elde edilmiştir.

Bu makalenin devam eden bölümlerinde öncelikle literatür taraması ve analitik gecikme modellerine değinilmiştir. Daha sonra çalışma sahası ve verilerin toplanması hakkında bilgiler verilmiştir. Akabinde modellerin nasıl geliştirildiği hakkında bilgiler verilerek bulgular ortaya konmuştur. Son olarak ise sonuçlar verilerek önerilerde bulunulmuştur.

2. Literatür Taraması

2.1. Gecikme modelleri

Literatürde, sinyalizasyon kavşaklarındaki taşıt gecikmelerini yapay zekâ yöntemleri ile tahmin eden pek çok model yer almaktadır. Sinyalizasyon kavşaklarındaki taşıt gecikmelerini, yapay zekâ yöntemlerinden Bulanık Mantık (BM) ile tahmin eden Qiao vd. (2002) ve Murat (2006), ileri beslemeli YSA kullanarak tahmin eden Başkan (2004), hem BM hem de YSA modelleri ile tahmin eden Murat (2006) ve Mutlu&Yavuz (2008), analitik modellerle kıyaslandığında gerçek gecikme değerlerine daha yakın tahminler ortaya koymuşlardır. Atalay (2004) ve Hasiloğlu vd. (2014), uyarlamalı ağ tabanlı nöro-bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) modeli ile sinyalizasyon kavşaklarındaki taşıt gecikmelerini analitik modellerden daha iyi tahmin etmiştir. Akgüngör (2004) sinyalizasyon kavşaklarında gecikmeyi tahmin eden zamana bağlı bir matematiksel model geliştirmiştir. Literatürde yer alan diğer modeller bulguları ile birlikte kronolojik sırayla Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Literatür

Literatür	Model/Uygulama	Bulgular
(Doğan vd.,2016)	YSA	Sinyalize kavşaklardaki taşıt gecikmesi ve durma sayısını tahmin eden iki model YSA ile geliştirilmiştir. YSA-gecikme modelinin, YSA-durma modelinden daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir.
(Korkmaz,2016)	Diferansiyel gelişim algoritması (DGA), Yapay arı kolonisi algoritması (YAKA)	Farklı formlarda oluşturulan gecikme modellerinin DGA ve YAKA ile optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Yarı kuadratik formda oluşturulan ve DGA'ya göre optimize edilen modelin gecikme değerlerini akın tahmin ettiği tespit edilmiştir
(Preethi vd., 2016)	Analitik modeller, YSA	YSA ile üç ayrı trafik durumu için modellenmiştir. YSA modelinin analitik modellerden daha iyi gecikme tahmini yaptığı ortaya konmuştur.
(Masouleh,2017)	Bluetooth teknolojisi	Bluetooth teknolojisi ile gecikme ve seyahat süre tahmin edilmiştir. Yöntemin sinyalize kavşaklardaki kontrol gecikmesini, gerçek gecikme değerlerine yakın tahmin ettiği tespit edilmiştir.
(Garshasebi,2018)	Lineer regresyon (LR) Destek vektör regresyonu (SVR) Rassal orman regresyonu (RF)	LR ve RF ile oluşturulan modellerin taşıt gecikmelerini daha doğru tahmin ettiği tespit edilmiştir.
(Balta&Özçelik, 2019)	Yazılım tanımlı ağlar (SDN) Karınca kolonisi algoritması (KKA)	SDN temelli KKA'nın ortalama gecikmeyi, geleneksel tekniklerden %15-22 hesaplamalı tekniklerden ise %7-12 daha iyi tahmin ettiği tespit edilmiştir.
(Harb vd.,2019)	Bulanık mantık (BM)	BM yönteminin aynı yeşil sürede daha fazla taşıttan kavşaktan geçmesini sağladığı ve sabit süreli denetimden üstün olduğu tespit edilmiştir.
(Bağdatlı, 2020)	Gen ekspresyonu programlama (GEP)	GEP modelleri analitik modellerden daha başarılı sonuçlar üretmiş olup YSA ile Bulanık-Ağ modelleri kadar tutarlı sonuçlar ortaya koymuştur.

2.2. Adaptif sinyal yönetim sistemleri

Günümüzde kullanılan birçok ASYS türü model temelli çalışmaktadır. Model temelli ASYS'ler trafiğin mevcut durumunu tahmin etmek için makroskobik, mezoskobik ve mikroskobik modeller kullanmaktadır. Tahmin değerleri sinyal sürelerini ayarlamak için bir girdi olarak kullanılmaktadır. Model temelli olmayan ASYS'ler ise, trafik koşullarının değişimini tanımlayan parametreler arasındaki fonksiyonel ilişki üzerinde çalışmakta olup, önceki aralıkta ölçülen trafiğin geri bildirimlerini kullanmaktadır (Aavani vd.,2017). Sinyal kontrolü üzerine bilimsel araştırmalar yapan ülkeler kendilerine özgü sinyal kontrol sistemlerini hayata geçirmişlerdir (Akbaş&Akdoğan,2001).

Literatüde ASYS ile kontrol edilen kavşaklar üzerine yapılmış önemli sayıda çalışma bulunmaktadır. Shoufeng vd. (2008), izole sinyalize bir kavşağın performansını, sabit süreli sinyal denetimi ve Q-learning algoritması temelli ASYS'i karşılaştırarak analiz etmiştir. Analiz sonuçlarına göre Q-learning tabanlı yöntemin gecikmeleri azalttığı tespit edilmiştir. Samadi vd. (2012), bir ASYS olan SCATS'ın performansını, trafik uyarımlı kontrol sisteminin performansı ile karşılaştırmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına göre SCATS'ın sürekli olarak taşıtların seyahat süreleri ile ortalama durma ve yaklaşım gecikmelerini azalttığı belirlenmiştir. Gündoğan vd. (2014), ATAK isimli bir ASYS geliştirmişlerdir. Bu sistemde genetik algoritma (GA) ve bulanık mantık (BM) optimizasyon tekniği kullanılmıştır. Sinyal sürelerini optimize etmek için GA, kontrol cihazlarının çalışması sırasında meydana gelebilecek istisnai durumları kontrol etmek için ise BM kullanılmıştır. Bu çalışmada ATAK ile optimum sabit süreli kontrol sisteminin performansı karşılaştırılmış olup ATAK ile seyahat sürelerinin yaklaşık %15 oranında kısaldığı tespit edilmiştir. Yulianto&Sutanto (2014), BM temelli bir ASYS modeli geliştirmiş olup, ASYS'nin etkinliği VISSIM simülasyon programı ile ölçülmüştür. Bu çalışma ile ASYS'nin, yüksek trafik hacimlerinde kavşak performansını arttırdığı ortaya konmuştur. Studer vd. (2015), ASYS'lerden SCATS, SCOOT, INSYNC ve UTOPIA trafik kontrol sistemlerinin performansları karşılaştırılmıştır. SCATS ve UTOPIA'nın metropol alanlarda, SCOOT'ın kentsel ve bölgesel alanlarda, INSYNC'nin ise sınırlı sayıdaki kavşaklarda kullanımının uygun olacağı belirlenmiştir. Bu çalışmada INSYNC'in performansının diğer ASYS'lerden daha yüksek olduğu ve gecikmeleri ortalama %30-70 arasında azalttığı tespit edilmiştir. Jin& Ma (2015), bir makine öğrenmesi yaklaşımı olan pekiştirmeli öğrenme yöntemi ile grup bazlı faz planları kullanılan bir ASYS modeli geliştirmişlerdir. Bu çalışmada iki farklı öğrenme algoritması olan SARSA ve Q-learning, SUMO simülasyon programı ile oluşturulmuş olan 4-kollu bir kavşak üzerinde test edilmiştir. Ayrıca grup bazlı sabit süreli kontrol sistemi, grup bazlı adaptif kontrol sistemi ile kıyaslanmıştır. Ortalama gecikmede SARSA (grup bazlı adaptif kontrol)'nin en iyi performansı gösterdiği, Q-learning (grup bazlı adaptif kontrol)'nin en iyi ikinci performansı gösterdiği, grup bazlı sabit süreli kontrolün ise en kötü performansı gösterdiği tespit edilmiştir. Odeh vd. (2015), BM ve GA'yı birleştiren hibrit bir algoritmayı ASYS üzerinde

kullanmışlardır. Ön zamanlı sinyal denetim sistemine göre hibrit algoritmanın %34'e varan iyileşme sağladığı tespit edilmiştir. Hibrit algoritmanın BM tabanlı denetim sistemine göre de %31'e varan iyileşme sağladığı belirlenmiştir. Adebıy vd. (2018), yapay zeka öğrenme algoritmalarından biri olan Yapay Arı Kolonisi algoritması (YAKA) ile fazların sinyal sürelerini optimize eden bir ASYS geliştirmiştir. Geliştirilen bu sistemin ortalama bekleme sürelerini azalttığı belirlenmiştir. Manandhar&Joshi (2018), yapay zeka algoritmalarından parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve istatistiksel çoklamının beraber kullanıldığı bir hibrit algoritmayı ASYS üzerinde test etmişlerdir. Hibrit algoritmanın ön zamanlı sistemlere göre bekleme sürelerini azalttığı tespit edilmiştir. Wu vd. (2019), Guguk Kuşu Arama (GKA) algoritması ile optimize edilmiş ve BM kontrolüne dayanan bir model geliştirmişlerdir. Bu modelin performansı, gerçek zamanlı sinyal kontrol sistemi ile yönetilen dört kollu kavşak üzerinde simülasyon deneyleri ile test edilmiştir. Ön zamanlı denetim sistemlerine kıyasla söz konusu modelin ortalama taşıt gecikmelerini azalttığı belirlenmiştir.

3. Analitik Gecikme Modelleri

Sinyalize kavşaklarda gecikmeyi tahmin etmek için farklı varsayımlara dayanan ve çeşitli trafik durumları için çok sayıda analitik model geliştirilmiştir. Bu modeller üç gruba ayrılmaktadır. Bunlardan birincisi doygun altı durumlar için Webster, Tanner ve Miller tarafından geliştirilen stokastik sabit ve dengeli gecikme modelleri, ikincisi doygun üstü durumlar için May&Keller, Neuberger ve Pignataro tarafında geliştirilen deterministik gecikme modelleri, üçüncüsü ise doygun altı ve doygun üstü durumları kapsayan ve Burrow, Catling, Brilon, Wu, Akçelik, Teply, HCM ve Kimber tarafından geliştirilen zaman esaslı gecikme modelleridir (Doğan vd., 2016). Söz konusu analitik modellerden yaygın olarak kullanılanlar Webster, HCM ve Avustralya (Akçelik) gecikme bağıntılarıdır.

Webster (Webster,1958), gecikme modelinde taşıt başına düşen gecikmeyi (d) üniform ve rastgele gecikmelerin toplamı olarak Denklem 1'deki şekliyle ifade etmiştir.

$$d = \left(\frac{0,5 C [1 - (\frac{g}{C})]^2}{[1 - (\frac{g}{C})x]} \right) + \left(\frac{x^2}{2v(1-x)} \right) \quad (1)$$

Burada,

- C : devre süresi (sn.),
- g : şerit başına etkili yeşil süre (sn.),
- x : doygunluk derecesi (v/c),
- v : trafik hacmi (ta/st),
- d : taşıt başına düşen gecikme (sn/ta),

olarak ifade edilmektedir.

HCM (HCM,2000) gecikme modelinde, bir şeritteki ortalama gecikmenin tespit edilmesi için sırasıyla üniform gecikme (d_1) Denklem 2, taşma gecikmesi (d_2) Denklem 3, başlangıç kuyruğundan dolayı tüm araçlara etkiyen gecikme değeri (d_3) ve taşıt başına kontrol gecikmesi (d) Denklem 4 yardımıyla hesaplanır.

$$d_1 = 0,50 C \frac{(1 - \frac{g}{C})^2}{1 - [\min(1,x) * \frac{g}{C}]} \quad (2)$$

$$d_2 = 900 T \left[(x - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{8kIx}{cT}} \right] \quad (3)$$

$$d = d_1(PF) + d_2 + d_3 \quad (4)$$

Burada,

- C : devre süresi (sn.),
- g : şerit başına etkili yeşil süre (sn.),
- x : doygunluk derecesi (v/c),
- d_1 : üniform gecikme (sn/ta),
- T : analiz periyodu (st),
- k : artan gecikme faktörü,
- I : filtreleme faktörü,
- c : şerit kapasitesi (ta/st),

- d_2 : taşma gecikmesi (sn/ta),
 PF : üniform gecikme dizisi düzeltme faktörü,
 d_3 : başlangıç kuyruğundan dolayı tüm araçlara etkiyen gecikme değeri (sn/ta),
 d : taşıt başına kontrol gecikmesi (sn/ta),

olarak ifade edilmektedir.

Denklem 3’de yer alan artan gecikme faktörü (k), sinyalizasyon türünün (ön zamanlı, uyarmalı vb.) etkisini gecikmeye dahil etmektedir. ÖSS’de, rastgele gelişlere bağlı kuyruklanma esasına göre k değeri 0,50 olarak kullanılmaktadır. Ancak uyarmalı sinyal yönetim sistemleri, yeşil süreyi trafik talebine göre uyarlayabildiği için artan gecikmeyi azaltma becerisine sahiptir. Gecikmenin azalması ise birim uzatma süresi ve x ’e bağlıdır. Birim uzatma süresi azaldıkça, artan k ve d_2 değeri de azalmaktadır. Ancak $x=1$ olduğunda uyarmalı sinyal yönetim sistemi, ÖSS gibi davranmaya başladığı için k değeri 0,50 olmaktadır. Ön zamanlı ve uyarmalı sinyal yönetim sistemlerine göre k değerleri Tablo 2’de yer almaktadır. HCM modelinde, ana kol için k değeri 0,5 alınmış olup, tali kol için k değerleri, Tablo 2 yardımıyla bulunarak gecikmeler hesaplanmıştır.

Tablo 2. Sinyalizasyon türüne göre artan gecikme faktörü (k) değerleri (HCM,2000).

Birim Uzatma Süresi (sn.)	Doğunluk Derecesi (x)					
	$\leq 0,50$	0,60	0,70	0,80	0,90	$\geq 1,00$
$\leq 2,00$	0,04	0,13	0,22	0,32	0,41	0,50
2,50	0,08	0,16	0,25	0,33	0,42	0,50
3,00	0,11	0,19	0,27	0,34	0,42	0,50
3,50	0,13	0,20	0,28	0,35	0,43	0,50
4,00	0,15	0,22	0,29	0,36	0,43	0,50
4,50	0,19	0,25	0,31	0,38	0,44	0,50
5,00	0,23	0,28	0,34	0,39	0,45	0,50
Ön zamanlı sistemler	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

Avustralya (Akçelik) gecikme modelinde, kuyruğun “0” olduğu doğunluk derecesi (x_0) Denklem 5’deki şekliyle, taşıtların ortalama gecikmesi (d) ise üniform ve taşma gecikmesinin toplamı olarak Denklem 6’daki şekliyle ifade edilmektedir (Roess vd., 2011).

$$x_0 = 0,67 + \left[\frac{sg}{600} \right] \quad (5)$$

$$d = \frac{C(1-\lambda)^2}{2[1-(\lambda x)]} + 900 T \left[(x - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{12(x-x_0)}{cT}} \right] \quad (6)$$

Burada,

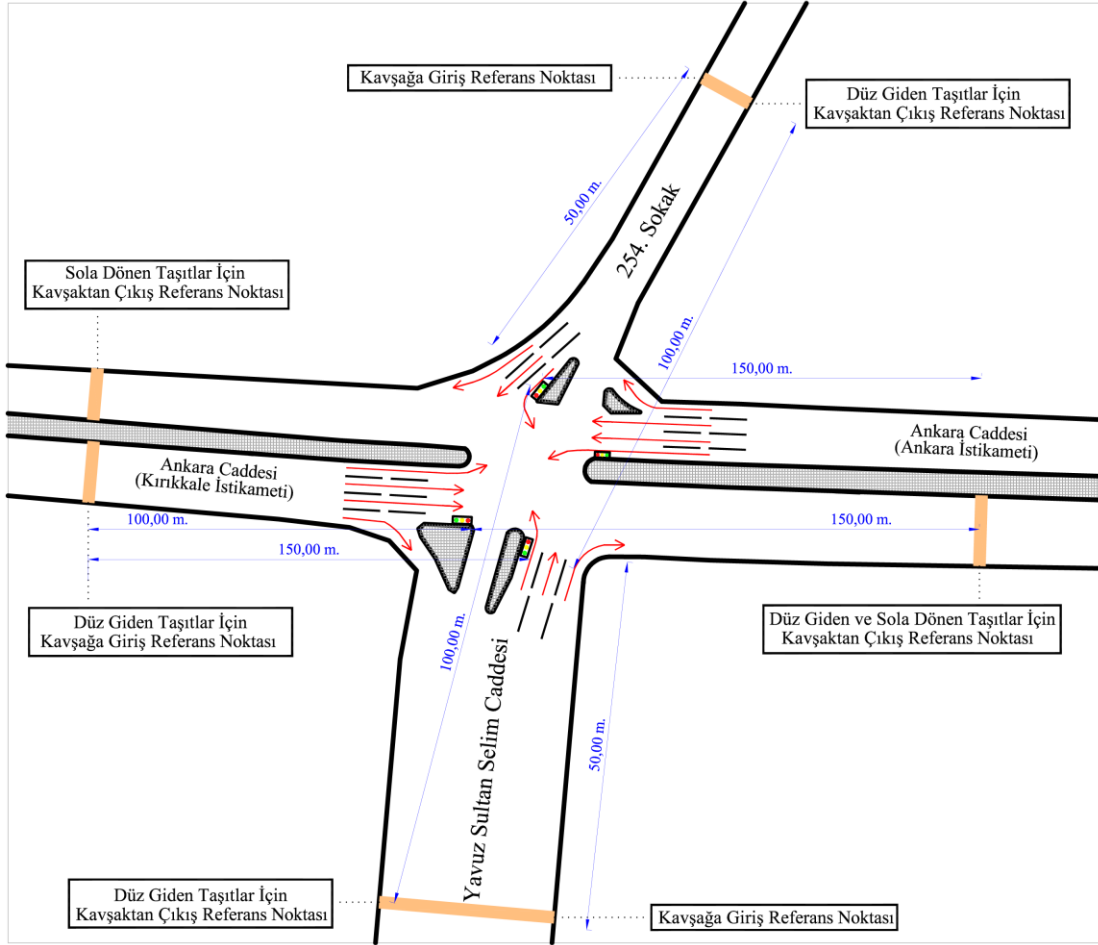
- x_0 :kuyruğun 0 olduğu doğunluk derecesi,
 s : doğun akım oranı (ta/st/şerit),
 g : şerit başına etkili yeşil süre (sn.),
 C : devre süresi (sn.),
 λ : etkin yeşil sürenin devre süresine oranı,
 x : doğunluk derecesi (v/c)
 T : analiz periyodu
 c : şerit kapasitesi (ta/st),
 d : toplam gecikme (sn/ta),

olarak ifade edilmektedir.

4. Verilerin Toplanması ve Modellerin Geliştirilmesi

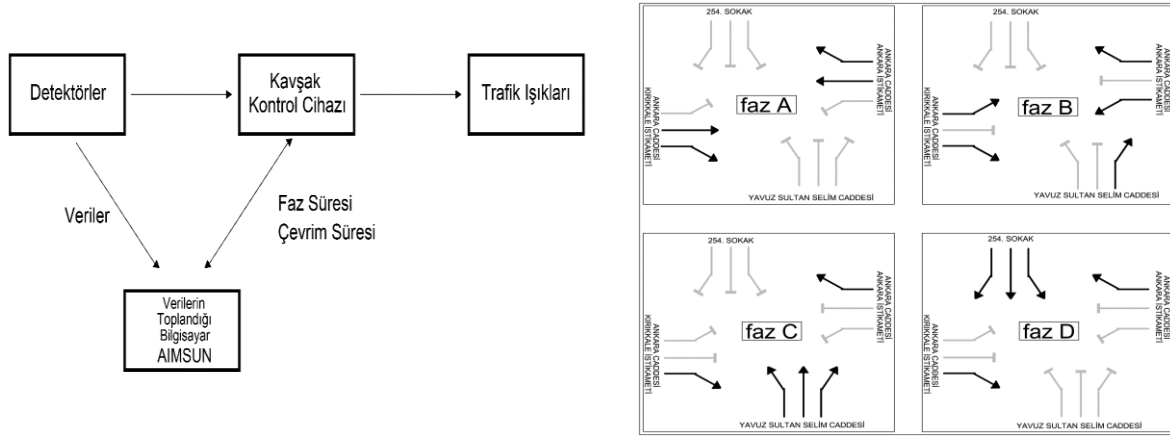
4.1. Uygulama kavşağı ve verilerin toplanması

Bu çalışmada kullanılan trafik verileri, Kırıkkale ili sınırlarında bulunan Yeni Sanayi Kavşağı'ndan toplanmıştır. Bu kavşak D-200 karayolu üstünde olup ASYS ile yönetilmektedir. Kavşak 4-kollu bir geometriye sahiptir. Ana arterlerde bulunan Ankara Caddesi (Kırıkkale İstikameti) ve Ankara Caddesi (Ankara İstikameti) yaklaşım kollarında 3.5'ere metre genişliğinde 4 adet kavşağa giriş şeridi bulunmaktadır. Bu şeritlerden 2 adedi düz giden taşıtlara, 1 adedi korumalı sol dönüş cebi olarak sola dönen taşıtlara, 1 adedi ise sağa dönen taşıtlara hizmet etmektedir. Ana arterlerde 2 adet de kavşaktan çıkış şeridi vardır. Tali arterlerde bulunan 254. Sokak ve Yavuz Sultan Selim Caddesi yaklaşım kollarında 3.5'ere metre genişliğinde 3 adet kavşağa giriş şeridi bulunmaktadır. Bu şeritlerden 1 adedi düz giden taşıtlara, 1 adedi sola dönen taşıtlara, 1 adedi ise sağa dönen taşıtlara hizmet etmektedir. Tali arterlerde 2 adet de kavşaktan çıkış şeridi bulunmaktadır. Şekil 1' de Yeni Sanayi Kavşağı'nın şerit kullanım şeması bulunmaktadır. Bu şemada yaklaşım kollarının kavşağa giriş ve çıkış referans noktaları, sinyalizasyon sisteminden olan mesafeleri ile birlikte gösterilmektedir.



Şekil 1. Yeni sanayi kavşağı şerit kullanım şeması

Çalışma için seçilen Yeni Sanayi Kavşağı gerçek zamanlı adaptif kavşak yönetim sistemi ile denetlenmektedir. Kavşakta alan algılaması yapan bir adet balıkgözü kamera ve her şerit için birer tane de detektör bulunmaktadır. Elde edilen veriler Şekil 2' de görüldüğü gibi, AIMSUN programına gönderilmektedir. Bu veriler bilgisayar ortamında AIMSUN tarafından işlenerek kavşaktaki faz ve çevrim süreleri belirlenmektedir. Gerçek zamanlı olarak belirlenen faz ve çevrim süreleri kavşak kontrol cihazına aktarılarak sinyal süreleri tespit edilmektedir. Kavşağın kontrolü dört fazlı olarak gerçekleştirilmektedir. Sanayi kavşağında sırasıyla A, B, C ve D faz planları çalışmaktadır. Kavşağın faz planı Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Yeni sanayi kavşağı ASYS yöntem şeması ve faz düzeni

Kırıkkale Sanayi Kavşağı'nda bulunan detektörler sayesinde taşıtın hangi yönden geldiği ve hangi yöne gittiği verisi elde edilmektedir. Ayrıca kavşak içi tıkanıklık, kavşağa girişlerde yoğunluk ve kavşakta geçirilen süre gibi çok önemli veriler anlık olarak toplanmaktadır. Detektörler, taşıt tipine göre sayımları da yapmakta olup, böylece taşıtların sınıflarına göre kavşak içindeki seyirinden elde edilen verilere göre kavşağın karakteristiği belirlenebilmekte ve simülasyona yansıtılabilmektedir. Sonuç olarak detektörlerden ve kavşak kontrol cihazlarından alınan trafik verileri, AIMSUN trafik modelleme ve simülasyon programı kullanılarak ve anlık sinyalizasyon verileri ile eşleştirilerek, yaklaşım kollarında bulunan kırmızı, sarı ve yeşil süreler gerçek zamanlı olarak ayarlanmaktadır.

Kavşaktaki gecikme gözlemleri, hem kavşaktaki tüm yaklaşım kollarını ve bu yaklaşım kollarındaki taşıtların kavşağa giriş ve kavşaktan çıkış referans noktalarını gören bir adet balık gözü video kamera yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 3' de video kamera görüntüsü yer almaktadır. Gözlemler hafta içi perşembe ve cuma iki gün, hafta sonu ise cumartesi bir gün olmak üzere toplam 3 gün süre ile yapılmıştır. Böylece, farklı trafik akım örüntüsü gösteren hafta içi ve hafta sonu günleri modelin eğitilmesine katılmıştır.



Şekil 3. Video kamera görüntüsü

Ele alınana kavşak, birçok ili birbirine bağlayan Türkiye'nin önemli ve yoğun kavşaklarından biridir. Bu nedenle günün önemli bir bölümünde yoğunluk ana kollarında yüksek olmaktadır. Fakat, video kameranın tipinden dolayı video işleme tekniği ile otomatik sayım yapabilen programlar kullanılamamış, gözlem ile sayımlar yapılmıştır. Bu nedenle, ana kollarından bir tanesi için sayım işlemi gerçekleştirilmiştir ve tüm gün yerine seçilen devreler analizler için kullanılmıştır. Devre seçiminde, taşıt kuyruğunun giriş referans noktasını geçmediği devreler ele alınmıştır. Böylece gözlemler sırasında oluşabilecek karışıklığın önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Bu yaklaşım kollarına ait devre adedi ve taşıt tiplerine göre ortalama bir saatlik akım oranları Tablo 3' de verilmiştir.

Tablo 3. Taşıt tiplerine göre yaklaşım için kullanılan devre adedi ve akım oranları

Yaklaşım Kolu	Devre Sayısı (adet)	Ağır Ticari Taşıt Akım Oranı	Hafif Ticari Taşıt Akım Oranı	Otomobil Akım Oranı	Toplam Akım Oranı
Ankara Caddesi (Kırıkkale İstikameti)	40	179	133	1406	1718
254. Sokak Tarafı	240	10	23	99	132
Yavuz Sultan Selim Caddesi Tarafı	207	10	15	48	73
Toplam	487	199	171	1553	1923

Bir kavşaktaki gecikme, kontrol sisteminden dolayı oluşan fazladan beklemedir. Bir taşıtın giriş ve çıkış referans noktasından geçtiği zaman sırasıyla, t_g ve t_c olsun. Bu durumda, yaklaşım koluna geçiş hakkı verilmiş ve taşıt kuyruğu yok ise, bu taşıtın kavşağı serbest boşaltma süresi, $t_s = t_c - t_g$ olur. Diğer taraftan taşıt, geçiş hakkına sahip olmayan bir kolda kontrol sisteminden kaynaklanan bir gecikmeye (d) maruz kalır. Kavşağı kontrollü boşaltma süresi, t_k ise; bu durumda taşıt gecikmesi $d = t_k - t_s$ olacaktır. t_s değerini tespit edebilmek için, taşıtların, kolun geçiş hakkına sahip olduğu ve taşıt kuyruğunun olmadığı durumlar için kavşağı serbest boşaltma süresi (t_s) farklı taşıt türlerine göre gözlenmiş ve Tablo 4’ de sunulmuştur.

Tablo 4. Bir devredeki taşıt gecikmesi hesabı için örnek durum

Yaklaşım Kolu	Video Kayıt Zamanı						
	Taşıt Cinsi	Taşıt Hareket Yönü	Giriş Zamanı (tg)	Çıkış Zamanı (tc)	t_s (sn.)	Kavşak Boşaltma Süresi (sn.)	Taşıt Gecikmesi (sn.)
Ankara Caddesi (Kırıkkale İstikameti)	Otomobil	Düz	00:53:07	00:54:25	78	7	71
	Ağır Ticari Taşıt	Düz	00:38:00	00:39:25	85	10	75
	Hafif Ticari Taşıt	Düz	00:45:08	00:45:20	12	8	4
Yavuz Sultan Selim Caddesi	Otomobil	Sol	00:14:02	00:15:45	103	10	93
	Ağır Ticari Taşıt	Sol	00:12:49	00:15:54	185	18	167
	Hafif Ticari Taşıt	Düz	00:15:03	00:15:51	48	13	35
254. Sokak	Otomobil	Düz	00:07:22	00:09:20	118	10	108
	Ağır Ticari Taşıt	Sol	00:07:11	00:09:25	134	18	116
	Hafif Ticari Taşıt	Sol	00:07:15	00:09:14	119	13	106

Gecikme değerleri, kavşağın sahip olduğu sinyal ve trafik değişkenlerine bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle adaptif olarak yönetilen kavşağa ait değişkenler devre bazlı ele alınmış ve değişken isimleri numaralandırılarak Tablo 5’ de verilmiştir. Veriler ana kol (Ankara Caddesi) ve tali kol (254. Sokak ve Yavuz Sultan Selim Caddesi) olmak üzere iki grup halinde toplanmıştır. Veriler hem ana kol hem de tali kol için 7 adet kategoride toplanmış olup bu kategoriler Tablo 5’ de gösterilmektedir.

Tablo 5. Girdi değişkenleri

Girdi Değişkenleri Numarası (GDN)	Girdi Değişkeni Adı
1	Kırmızı ve sarı süre
2	Yeşil süre (g)
3	Devre süresi (c)
4	Yeşil sürenin devre süresine oranı (g/c)
5	Toplam taşıt sayısı (TTS)
6	Ağır ticari taşıt sayısı (ATS)
7	Ağır ticari taşıt sayısının toplam taşıt sayısına oranı (ATS/TTS)

Toplanan verilerde düzenli eğilimlerden büyük ölçüde sapmış aykırı verilere rastlanmış olup aykırı verileri veri setinden çıkartmak için temizleme tekniği olarak SPSS istatistik programından faydalanılmıştır. Gecikme dahil 8 kategorili verilerin bulunduğu veri setindeki çok değişkenli aykırı değerleri bulmak için değişkenlerin puanlarının kombinasyonunda olağan dışı olan puanlar tespit edilmiştir. Bunu yapabilmek için SPSS programının doğrusal regresyon analizi kısmı kullanılmış olup, bağımlı ve bağımsız değişkenler tespit edilerek

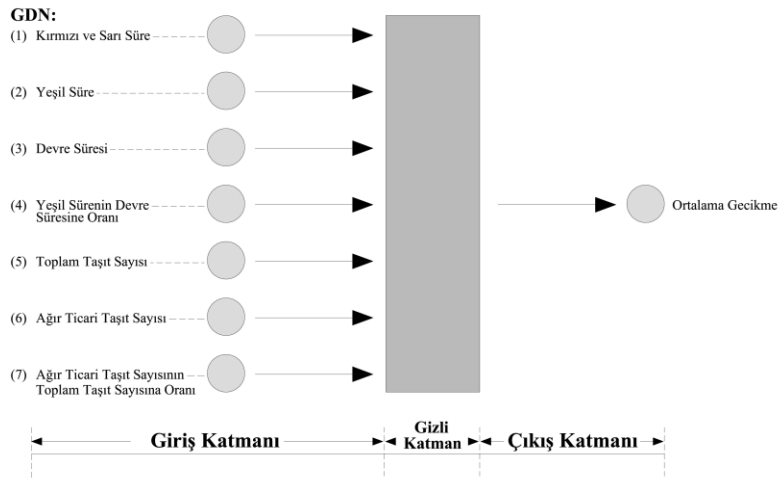
her bir devre için Mahalanobis mesafeleri oluşturulmuştur. Mahalanobis uzaklığı, çok değişkenli aykırı değer tespitinde kullanılan tekniklerden biridir (Esen&Timor,2019). Doğrusal regresyon analizinde bağımlı değişken gecikme olarak girilmiş olup, kırmızı ve sarı süre, yeşil süre, devre süresi, yeşil sürenin devre süresine oranı, toplam taşıt sayısı, ağır ticari taşıt sayısı, ağır ticari taşıt sayısının toplam taşıt sayısına oranı ise bağımsız değişkenler olarak girilmiştir. Daha sonra ise Mahalanobis mesafe puanları tekrar analiz edilerek en yüksek ve en düşük puanlar belirlenmiştir. Böylece hangi değerlerin çoklu değişkenlerde aykırı değer olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak 254. sokak yaklaşım kolu için toplanan ham veri sayısı 240 iken bu sayı aykırı veriler çıkartıldıktan sonra 230'e düşmüştür. Yine Yavuz Sultan Selim Caddesi yaklaşım kolu için toplanan ham veri sayısı 207 iken bu sayı aykırı veriler çıkartıldıktan sonra 206'ya düşmüştür. Ankara Caddesi yaklaşım kolunda ise aykırı veriye rastlanmamıştır.

4.2. YSA ile model geliştirilmesi

Yapay sinir ağları (YSA), insan beynindeki biyolojik nöronların çalıştığı mekanizmalardan ilham alan ve insan beyninin öğrenme fonksiyonunu örnekler yardımı ile gerçekleştiren bilgisayar sistemleridir (Ding, 2007; Öztemel, 2006). YSA, verilerden elde ettikleri bilgiler ile insan beyninin fonksiyonel özelliklerine benzer bir şekilde öğrenme, ilişkilendirme, sınıflandırma, genelleme, özellik belirleme ve optimizasyon yapabilmektedir (Öztemel, 2006). Nöronlar içeren sinir hücrelerinin çeşitli şekillerde birbirine bağlanması ile oluşan YSA üç ana katmandan oluşmaktadır. Bu katmanlar giriş katmanı, gizli (ara) katman ve çıkış katmanı olarak adlandırılmaktadır. Giriş katmanında, yapay sinir ağına dışarıdan gelen veriler bulunmaktadır. Giriş katmanından çıkan verilerin iletiği ve işlendiği katmana gizli (ara) katman denmekte olup, YSA ile oluşturulan mimarilerde hiç gizli (ara) katman bulunmadığı gibi birden çok gizli (ara) katman da bulunabilmektedir. Gizli (ara) katman veya katmanlardan gelen bilgiler ile ağıdaki çıktıları üreten katmana ise çıkış katmanı denmektedir.

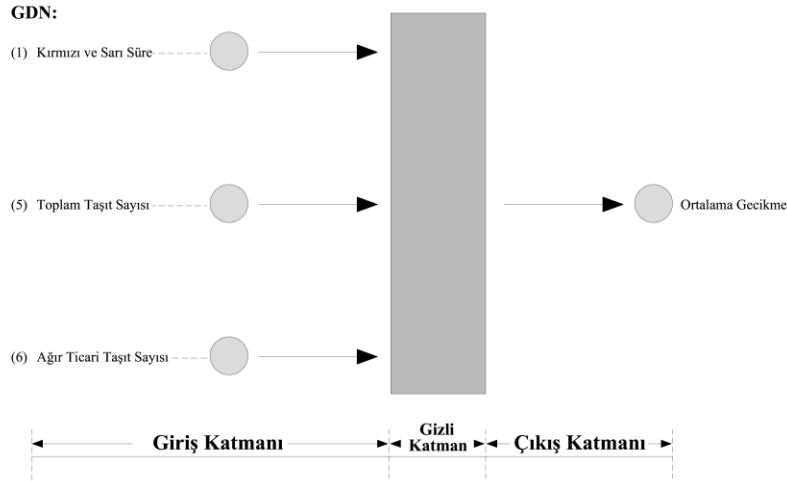
Bu çalışmada YSA modeli ileri beslemeli geri yayılım sinir ağı kullanılarak modellenmiştir. Bu modelde 1 adet giriş katmanı, 1 adet gizli katman ve 1 adet çıkış katmanı kullanılmıştır. Gizli katmandaki nöron sayısı 1'den 50'ye kadar artırılarak model test edilmiştir. Böylelikle 50 adet senaryo oluşturulmuş olup, bu senaryoların performanslarının karşılaştırılması yapılarak en uygun gizli katman nöron sayısı belirlenmiştir.

YSA modelinin eğitilmesinde girdi parametreleri olarak Şekil 4 ve 5' de sunulan iki ayrı girdi kümesi (GD-1 ve GD-2) kullanılmıştır. Tüm girdi değişkenleri (GDN:1,2,3,4,5,6,7) arasında korelasyon analizi yapılmış olup, böylece değişkenler arasındaki doğrusal ilişki irdelenmiştir. Yapılan korelasyon analizi sonucunda kırmızı ve sarı süre (GDN:1), toplam taşıt sayısı (GDN:5) ve ağır ticari taşıt sayısı (GDN:6) arasında bir ilişkiye rastlanmıştır. Bu nedenle veri kümesi tüm girdi değişkenlerini içeren GD-1'e göre ve kırmızı ve sarı süre, toplam taşıt sayısı, ağır ticari taşıt sayısını içeren GD-2'ye göre iki gruba ayrılmıştır. İlk veri kümesinde (GD-1), Şekil 4' de belirtilen değişkenler YSA'nın eğitilmesinde girdi parametreleri olarak kullanılmıştır. Ortalama gecikme ise çıkış parametresi olarak kullanılmıştır.



Şekil 4. GD-1'e göre YSA modeli parametreleri

İkinci veri kümesinde (GD-2), Şekil 5'de belirtilen değişkenler YSA'nın eğitilmesinde girdi parametreleri olarak kullanılmıştır. Ortalama gecikme ise çıkış parametresi olarak kullanılmıştır.



Şekil 5. GD-2'ye göre YSA modeli parametreleri

YSA modelinde kullanılan geri yayılım algoritması, tekrarlı öğrenme sergileyen ve daha doğru tahmin sonuçları ortaya koyan bir metottur (Siregar&Wanto, 2017). Bu nedenle YSA modelinde GD-1 ve GD-2'den oluşan veri kümelerini eğitmek için yapay sinir ağlarının eğitilmesinde geri yayılım algoritması kullanılmıştır. YSA'ların eğitilmesinde sağladığı hız ve kararlılık nedeniyle Levenberg–Marquardt (LM) algoritması tercih edilmiştir (Çavuşlu vd., 2012). Ağın eğitiminde ana kol için 40 adet veri, tali kol için ise 436 adet veri kullanılmıştır.

Literatürde yapay zeka modellerinin başarısının değerlendirilmesinde K-katlamalı çapraz doğrulama (ÇD) yöntemi sıklıkla uygulanmaktadır (Anguita vd., 2012). Bu nedenle ana kol ve tali koldaki veriler üzerinde K-katlamalı ÇD yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde K değeri 4 olarak (K=4) seçilmiş olup veri kümesi 4 eşit parçaya bölünmüştür. Ana koldaki 40 adet veri ve tali koldaki 436 adet veri dört gruba ayrılmıştır. YSA modelinde K-katlamalı ÇD yöntemi kullanılarak tüm veri üzerinde hem test hem de eğitim işlemi yapılmıştır.

Eğitim ve test veri setlerinde kırmızı süre, yeşil süre, devre süresi, yeşil süre/devre süresi, TTS, ATS, ATS/TTS ve gecikme parametreleri yer almakta olup, örnek olarak 10 adet eğitim ve test verisi Tablo 6' da gösterilmektedir.

Tablo 6. YSA modeli örnek eğitim ve test verileri

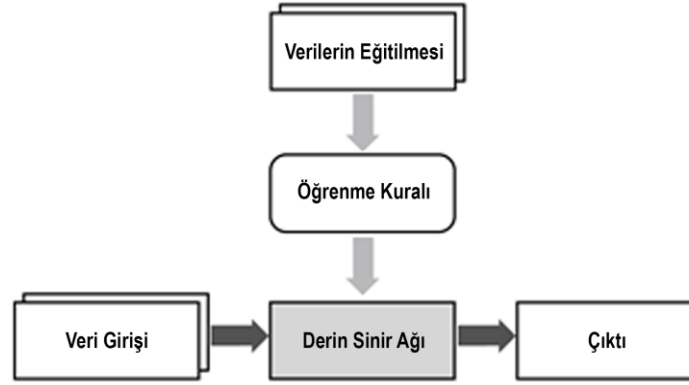
Kırmızı Süre (sn)	Yeşil Süre (sn)	Devre Süresi (sn)	Yeşil Süre / Devre Süresi	TTS (adet)	ATS (adet)	ATS / TTS	Gecikme (sn/ta)
66	143	209	0.68	87	16	0.18	22.69
81	136	217	0.63	88	8	0.09	30.76
74	138	212	0.65	89	12	0.13	26.89
89	135	224	0.60	94	3	0.03	29.98
75	127	202	0.63	95	11	0.12	24.62
70	150	220	0.68	97	8	0.08	17.30
70	128	198	0.65	98	9	0.09	26.77
90	118	208	0.57	98	6	0.06	28.76
76	147	223	0.66	99	16	0.16	18.20
82	126	208	0.61	102	14	0.14	35.45

Yapay sinir ağlarının eğitim ve test işleminde Matlab R2018b paket programının yapay sinir ağları araç kutusu (Neural Network toolbox) kullanılmıştır. Ana kol ve tali kolda hem GD-1'e göre hem de GD-2'ye göre YSA modeli oluşturulmuştur. Sonuç olarak YSA modeli ile bulunan gecikme değerleri ile gerçek gecikme değerleri karşılaştırılmış olup, mukayese yapılırken performans ölçütleri olan OKH, OKHK ve OMYH değerleri hesaplanmıştır. 4 farklı veri kümesi ile çalıştırılan YSA modelinin performans sonuçları ayrı ayrı 4 sonuç şeklinde elde edilmiş olup, genel bir sonuç bulmak için bu sonuçların aritmetik ortalaması alınmıştır.

4.3. Derin öğrenme ile model geliştirilmesi

Beynin yapısal ve işlevsel özelliklerinden esinlenilerek tasarlanmış, çok katmanlı ağ yapıları olan yapay sinir ağları üzerinde çalışan algoritmalar ve modeller kümesine Derin Öğrenme denir (Akbaş, 2018). Derin öğrenme makine öğrenmesinin bir alt dalı olup, derin kelimesi birden fazla gizli katmanı ifade etmektedir. Nitekim YSA modellerinde bir veya iki gizli katman ile öğrenme sağlanırken

Derin Öğrenme modellerindeki gizli katman sayıları oldukça fazladır (Özdağ, 2019). Tarihte ilk derin öğrenme algoritması 1965 yılında Ivakhnenko ve Lapa tarafından yayınlanmıştır. Bu çalışmada çok katmanlı ağ mimarisi kullanılmış olup, her katmandaki en iyi özellikler bir sonraki katmana iletilmiştir (Şeker vd., 2017). Şekil 6’da makine öğrenmesi ile derin öğrenme arasındaki ilişki gösterilmektedir (Kim, 2017).

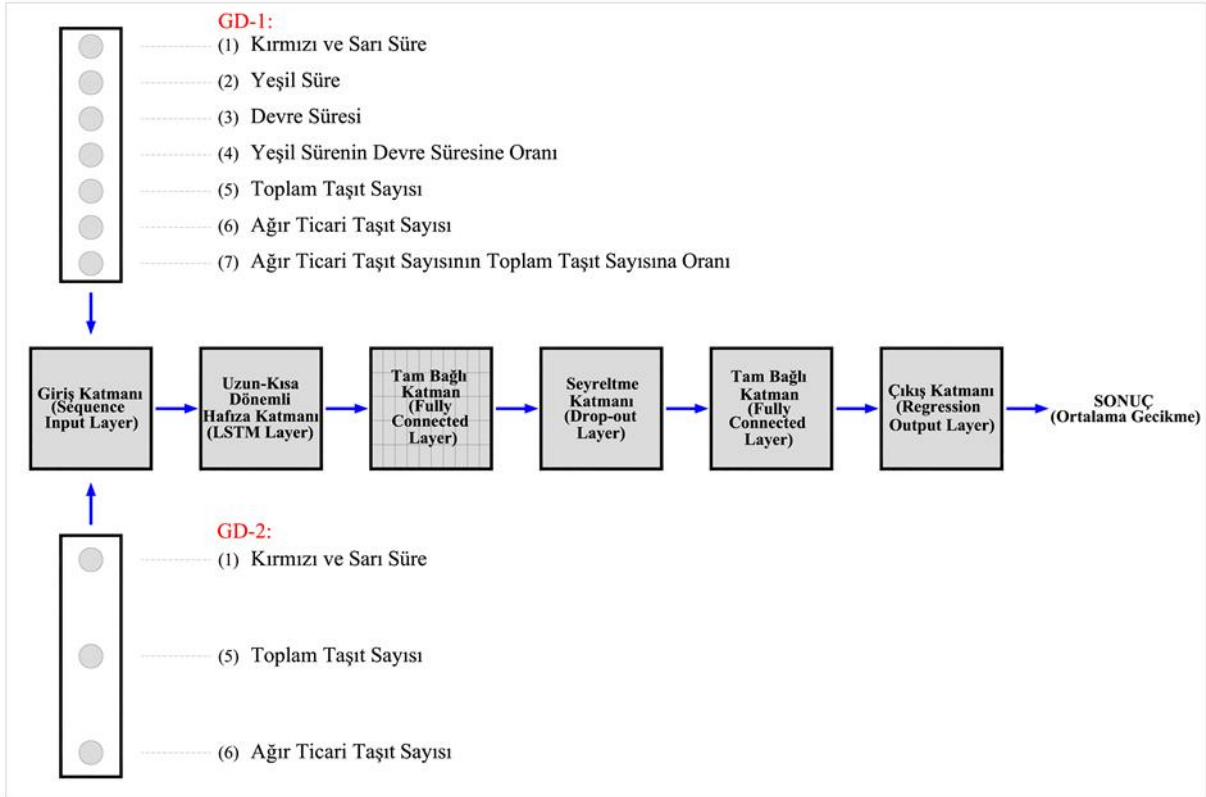


Şekil 6. Makine öğrenmesi ile derin sinir ağı arasındaki ilişki

Derin öğrenme modellerini klasik YSA’dan ayıran en önemli özellik derin öğrenme modellerinin daha çok veri ile daha çok işlem gücüne sahip olmasıdır. Diğer bir özellik ise derin öğrenme modellerinin, doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonları, ilkleme ve düzenleme yöntemlerini barındırmasıdır (Akbaş, 2018). Derin öğrenmeyi, derin evrişimli sinir ağı olarak, evrişimli kelimesini ise çok katmanlı olarak tanımlamak mümkündür. Evrişimli sinir ağı kullanılırken ön işlem, özellik çıkarımı ve sınıflandırma-tespit olmak üzere üç evre ortaya konmaktadır. Ancak derin evrişimli sinir ağına ön işlem ve özellik çıkarımı evreleri yok sayılmakta olup, bu evrelerin yaptığı işlemler sinir ağı içerisinde otomatik olarak yapılmaktadır (Doğan&Türkoğlu, 2018).

Bu çalışmada DÖM modellerinin geliştirilmesinde sıkça tercih edilen sinir ağı olan evrişimli sinir ağları kullanılmıştır. DÖM’de dizi giriş katmanı, uzun kısa dönem hafıza (LSTM) katmanı, tam bağlı katman, seyreltme katmanı, regresyon katmanı olmak üzere 5 tip katman kullanılmıştır. Dizi giriş katmanı ile 4-katlı ÇD yöntemi kullanılarak oluşturulmuş olan eğitim ve test veri setlerinin ağa giriş yapması sağlanmıştır. LSTM’de eğitim ve test veri setlerini hafızada tutan bellek hücreleri yer almaktadır. Bu bellek hücreleri hangi verinin tutulup hangi verinin atılacağına karar vererek veri dizilerinin devam ettirilmesini sağlamaktadır. LSTM katmanı kullanılarak ağın, veri dizileri ve zaman arasındaki uzun vadeli bağımlılıkları öğrenmesi sağlanmıştır. LSTM katmanında 250 adet nöron kullanılmıştır. Tam bağlı katmanlar kendinden önceki katmanların tüm alanlarına bağlı olduğu için ve katman sayısı arttıkça model daha iyi öğrendiği için DÖM’de 50 adet tam bağlı katman kullanılmıştır. Literatürde seyreltme değeri 0 ile 1 aralığında bir değer olarak tanımlanmakta (Çarkacı, 2018) olup DÖM’de seyreltme katmanında, seyreltme değeri 0,5 alınmıştır. Son olarak çıkış katmanı regresyon katmanı olarak tanımlanmış olup bu katmanda OKH değerleri hesaplanmıştır.

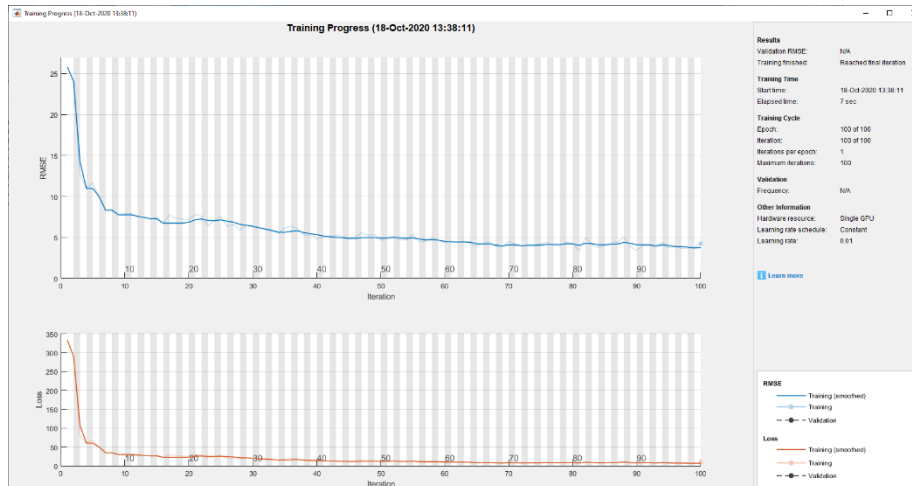
YSA modelinde 4-katlı ÇD yöntemi kullanılarak oluşturulmuş olan eğitim ve test veri setleri DÖM’de de kullanılmıştır. Böylece DÖM’de de tıpkı YSA modelinde olduğu gibi tüm veri üzerinde hem test hem de eğitim işlemi uygulanmıştır. Ağın eğitilmesinde ana kol için 40 adet veri, tali kol için ise 436 adet veri kullanılmıştır. Sinyalizasyon parametreleri ve trafik akışını oluşturan ulaşım modlarının özellikleri gecikmeyi etkileyen önemli değişkenleri barındırmaktadır. Bu nedenle trafik akışını ve sinyalizasyonu birlikte ele alan iki girdi değişken kümesi (GD-1 ve GD-2) DÖM’nin eğitilmesinde kullanılmıştır. GD-1 yedi farklı sinyal ve trafik değişkenini içeren ve sahadan toplanması kolay olan veri tipleridir. GD-2 ise üç değişkenden oluşmaktadır. Şekil 7’de DÖM’nin mimarisi ve bu girdiler sunulmuştur. Bu girdilerin seçilmesinde ilgili korelasyon matrisi oluşturulmuş; kendi aralarında en düşük, bağımlı değişkenle en yüksek korelasyona sahip değişkenler seçilmiştir.



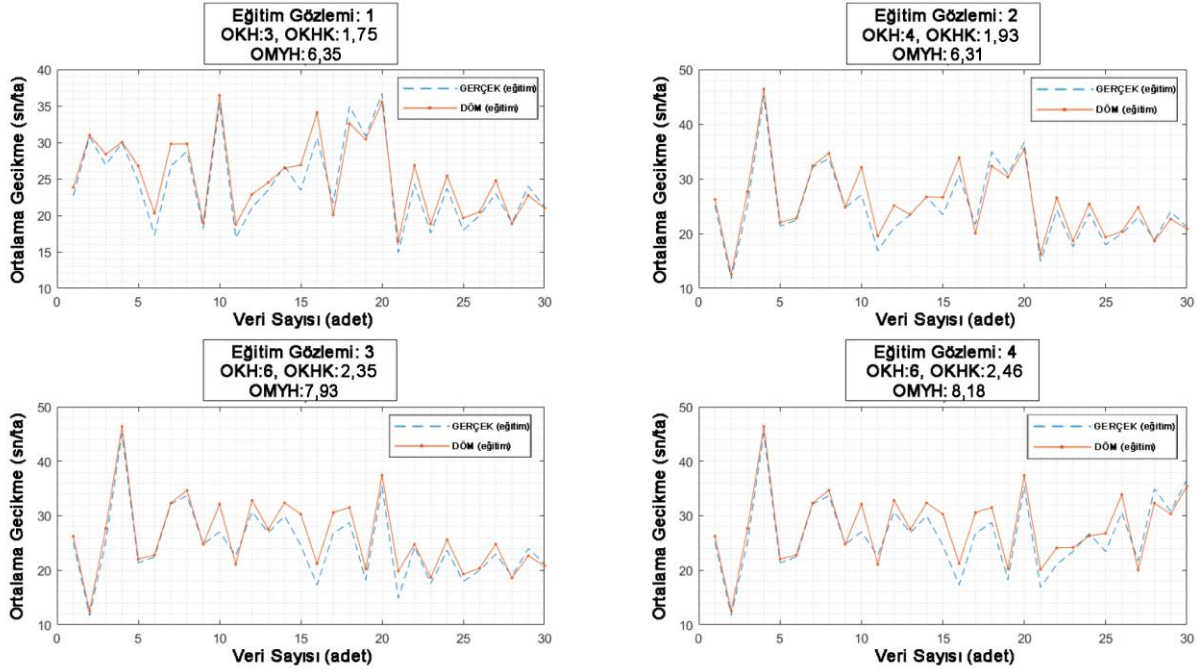
Şekil 7. DÖM'nin mimarisi

Derin öğrenme uygulamalarında adam, adamax, SGDM, adagrad ve adadelta gibi optimizasyon algoritmaları kullanılmaktadır (Çarkacı, 2018). DÖM'de, derin sinir ağlarını eğitmek için özel olarak tasarlanmış adaptif bir öğrenme oranı optimizasyon algoritması olan adam tercih edilmiştir. Bu algoritmada kullanılan momentum parametresi adam'ı diğer algoritmalarından ayırmaktadır (<http://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/trainingoptions.html>)

Veri setinde yer alan tüm değişkenlerin aynı anda işlenerek ağırlık öğrenmesi zaman alan ve belleği yoran işlemlerdir. Veri sayısı arttıkça hesaplama süreleri de uzamaktadır. Bu nedenle derin öğrenme uygulamalarında bu sorunu bertaraf etmek için veri seti küçük gruplara ayrılmakta ve ağırlık öğrenmesi seçilen bu küçük gruplar vasıtasıyla yapılmaktadır. Veri setinin küçük gruplar olarak işlenmesine "mini-batch" denmektedir (Çarkacı, 2018). DÖM'de mini batch değeri 32 olarak alınmış olup, böylece modelin aynı anda 32 adet veriyi işlemesi sağlanmıştır. Ayrıca DÖM'de eğitim için maksimum adım sayısı 250, başlangıç öğrenme hızı değeri 0,01 olarak seçilmiştir. Şekil 8'de DÖM'e ait bir eğitim işleminin adımlar boyunca hata değişimi verilmiştir. Hatalarda hızlı bir düşüş olduktan sonra, hata değerlerinin düşüşü azalarak devam etmektedir. Şekil 9' da ise ana kol için DÖM (GD-1)'e ait eğitim verilerinin, gerçek gecikme değerleri ile olan ilişkisi görülmektedir. DÖM tahminlerinin, gerçek değerlere yakın değerler ürettiği göze çarpmaktadır.



Şekil 8. DÖM'nin eğitim işlemi



Şekil 9. Ana kol için DÖM (GD-1) eğitim verilerinin sonuçları

Ana kol ve tali koldaki veriler üzerinde K-katlamalı çapraz doğrulama (ÇD) yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde K değeri 4 olarak seçilmiştir. Tüm modellerde K-katlamalı ÇD yöntemi kullanılarak tüm veri üzerinde hem test hem de eğitim işlemi yapılmıştır.

5. Bulgular ve Değerlendirme

Bu çalışmada, DÖM, adaptif sistemlerle yönetilen bir kavşağın gecikmelerini tahmin etmek için kullanılmıştır. Geliştirilen modelin etkinliğini test etmek amacıyla model, gecikme tahmininde sıklıkla kullanılan modeller ile karşılaştırılmıştır. Bu modellerden ikisi literatürde geçerliliği kabul edilmiş analitik modellerden HCM ve Avustralya (Akçelik) modeli olup, diğeri ise YSA modelidir. Bu bölümde söz konusu modeller saha ölçümleri ile karşılaştırılarak performansları değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelerde, OKH, OKHK ve OMYH olmak üzere üç adet performans ölçütü kullanılmıştır.

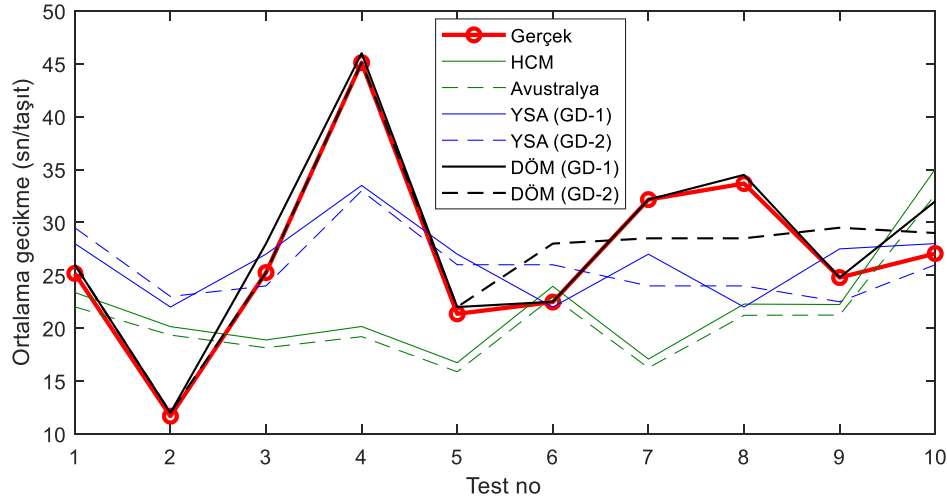
Yeni Sanayi kavşağı bir devlet yolu üstünde bulunduğundan, kavşak kolları hacim ve araç türlerinin dağılımı bakımından farklılık göstermektedir. Bu nedenle, karşılaştırmalar, ana ve tali kol olarak iki grup altında incelenmiştir. Modellerin ana kol ve tali kolda göstermiş olduğu performanslar Tablo 7' de sunulmuştur. İlk veri kümesi (GD-1) kullanılarak geliştirilen tüm modellerin OKH, OKHK ve OMYH değerine göre göstermiş olduğu performans sonuçları incelendiğinde, YSA ve DÖM modellerinin diğer modellerden önemli derecede düşük hata değerlerine sahip olduğu göze çarpmaktadır. Bu durum, yapay zeka modellerinin veriye daha iyi adapte yeteneği olduğunu ortaya koymaktadır. Diğer taraftan, DÖM modelinin her iki girdi kümesinde, YSA'dan daha düşük hatalar ürettiği görülmektedir. Analitik metotların bütün karşılaştırma ölçütleri için DÖM ve YSA modellerinden düşük performans gösterdiği anlaşılmaktadır.

Tablo 7. Modellerin yaklaşım kollarına göre hata değerleri

Model	Ana Kol			Tali Kol		
	OKH	OKHK	OMYH	OKH	OKHK	OMYH
DÖM (GD-1)	18	3,74	10,91	345	18,43	23,96
DÖM (GD-2)	39	5,63	19,41	760	27,11	46,04
YSA (GD-1)	28	5,17	17,98	795	27,66	45,87
YSA (GD-2)	37	6,06	21,54	793	27,55	44,35
Avustralya	88	8,69	30,86	1120	32,99	46,50
HCM	105	9,40	34,91	1072	32,13	46,66

Modellerin ana kol test kümesi için tahminleri ile gerçek gecikme değerleri Şekil 10'da verilmiştir. Avustralya ve HCM modellerinin birbirine yakın ve çoğu noktada gerçek değer altında gecikme değerleri ürettiği görülmektedir. Bu modellerin, test no: 1,6 ve 9 da

gerçek değerlere yakın tahminlerde bulunsa da, artış ve azalış durumlarına uyum sağlamadığı bir ortamda etrafında salındığı görülmektedir. Yani bir adaptif sistemde, devre başına inceleme ve modellemeler yapılsa bile yeterli uyumu sağlayamamaktadırlar. YSA modelinin değişimlere analitik modellerden daha iyi uyum sağladığı anlaşılmaktadır. Fakat özellikle gecikmenin yüksek olduğu 4, 7 ve 8 gibi noktalar için tahminleri gerçek değerlerden düşük kalmaktadır. Diğer taraftan düşük gecikmeye sahip olan "2" noktası için yaklaşık iki kat daha fazla gecikme değeri üretmiştir. Bu nedenle YSA yaklaşımının yüksek ve düşük değerlerdeki tahmin yeteneği beklenenin altındadır. Şekil 10'da DÖM modellerinin tahminleri siyah çizgi ile ifade edilmiştir ve bu çizgi çok az sapma dışında gerçek değerler ile örtüşmektedir. Bu da DÖM modelinin başarısının bütün değerler için oldukça tatmin edici olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 10. Modellerin ana kol için test sonuçları

GD-1 ile eğitilen DÖM modeli sonuçlarının GD-2 ile eğitilenlerden daha isabetli olduğu da diğer önemli bir sonuç olarak ortaya çıkmıştır. Fakat, daha az değişkene sahip olan GD-2'nin sahadan kolayca elde edilebilecek olması önemli bir avantajdır. Özellikle DÖM (GD-2) modelinin YSA ve analitik modellerden daha iyi sonuçlar vermediği açıktır. Bu nedenle, DÖM (GD-2) modeli, hızlı sonuçların gerektiği ön çalışmalar için avantajlı bir seçenek olarak değerlendirilmektedir.

6. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, adaptif sinyalizasyon bir kavşağın gecikmelerinin ölçülmesi için bir derin öğrenme modeli (DÖM) sunulmuştur. Ayrıca, bu model farklı girdiler ile eğitilerek sonuçlar irdelenmiştir. Geliştirilen DÖM gecikme modeli, literatürde kullanılan gecikme modelleri ile karşılaştırılarak etkinliği araştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, DÖM modelinin adaptif sistemlerde gecikme tahmini için uygun bir model olduğu belirlenmiştir. Gecikme tahmini için sıkça başvurulan analitik modellerin adaptif sistemlerdeki değişken parametrelere uyum sağlayamadığı ele alınan hata kriterinden açıkça görülmüştür. Bu nedenle ön zamanlı sistemler için etkin olan bu modellerin hızla yaygınlaşmakta olan ASYS kullanan kavşaklar için uygun olmadığı elde edilen sonuçlar arasındadır. YSA modelinin kapasitesinin ise analitik modellerden daha az hata yaptığı belirlense de DÖM modeli kadar gecikmeleri isabetli tahmin edemediği anlaşılmıştır. Bu nedenle, DÖM modellerinin ASYS'ye sahip kavşaklarda gecikme tahmini için kullanılması uygun olacaktır. Diğer taraftan DÖM modelinden tam verim alabilmek için DÖM, diğer modellerden daha fazla sayıda girdi çeşidine ve sayısına ihtiyaç duymaktadır. Bu durum bir dezavantaj olarak görülebilir. Fakat gelişen detektör ve iletişim teknolojileri bu bilgilerin elde edilmesini kolaylaştırmaktadır. Ayrıca yapılan analizler, az girdi çeşidi ile modellenen DÖM modellerinin, ele alınan diğer model yaklaşımlarından halen daha iyi sonuçlar üretebildiğine de göstermiştir. Bu nedenle DÖM kısıtlı veri çeşidinin toplanabildiği kavşaklar için önemli bir alternatif olma özelliğini taşımaktadır. Bu çalışmada uygulama bölgesinin sınırlı olması çalışmanın en önemli kısıtını teşkil etmektedir. İleri çalışmalarda, gecikme verisi sunan kaynak ve olanakların artmasıyla, DÖM modelinin farklı kavşaklardan alınan veriler ile de eğitilerek genelleme kabiliyetinin artırılması ve farklı kavşak geometrileri için etkinliğinin araştırılması amaçlanmaktadır.

Referanslar

- Aavani, P., Sawant, M.K., Sawant, S., & Deshmukh, R.S. (2017). A Review on Adaptive Traffic Control Systems. International Journal of Latest Engineering and Management Research (IJLEMR), Volume 02, Issue 01, PP. 52-57, January 2017.
- Adebiyi, R. F., Abubilal, K. A., Mu'azu, M. B., & Adebiyi, B. H. (2018). Development and Simulation of Adaptive Traffic Light Controller using Artificial Bee Colony Algorithm. Int J Intell Syst Appl, 10 (8), 68-74.
- Akbaş, A., Kent İçi Ulaşımında Ana Arterlerdeki Ulaşım Performansının Simülasyon Tabanlı Olarak Değerlendirilmesi. <http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/12065.pdf> (Erişim tarihi:31.10.2020)

- Akbaş, E. (2018). Derin Yapay Sinir Ağları ve Derin Öğrenme'ye Kısa Bir Giriş. Bilgisayar Mühendisleri Odası Semineri, Ankara.
- Akbaş, A., & Akdoğan, E. (2001). İstanbul Kent İçi Trafik Kontrol Sistemi Üzerine Bir Durum Değerlendirmesi. TMMOB Makine Mühendisleri Odası "İstanbul'da Kent İçi Ulaşım Sempozyumu" 28-29-30 Haziran 2001.
- Akgüngör, A.P. (2004). Sinyalize Kavşaklarda Gecikme Tahmininin Matematiksel Modellenmesi: Farklı Çözümleme Süreleri için Zamana Bağlı Yeni Bir Gecikme Modeli. Teknoloji, Cilt 7, (2004), Sayı 3, s.369-379.
- Anguita, D., Ghelardoni, L., Ghio, Allesandro, Oneto, L., & Ridella, S. (2012). The 'K' in K-fold Cross Validation. ESANN 2012 proceedings, European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning. Bruges, Belgium. i6doc.com publ., ISBN 978-2-87419-049-0. Available from <http://www.i6doc.com/en/livre/?GCOI=28001100967420>.2012.
- Atalay, A. (2004). Sinyalize Kavşaklardaki Gecikme Tahmininde Yapay Zeka Yöntemi İle Farklı Yöntemlerin Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Bağdatlı, M.E.C. (2020). Vehicle Delay Modeling at Signalized Intersections with Gene-Expression Programming. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2020, 146 (9): 04020107.
- Balta, M., & Özçelik, İ. (2019). Şehir İçi Kavşak Yönetim Sistemleri için SDN Temelli Bir VANET Mimari Önerisi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34:3 (2019) 1451-1468.
- Başkan, Ö. (2004). İzole Sinyalize Kavşaklardaki Ortalama Taşıt Gecikmelerinin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Çarkacı, N. (2018). Derin öğrenme uygulamalarında en sık kullanılan hiper parameteler. <https://medium.com/deep-learning-turkiye/derin-ogrenme-uygulamalarinda-en-sik-kullanilanhiper-parametreler-ece8e9125c4>. (Erişim tarihi: 31.10.2020)
- Çavuşlu, M.A., Becerikli, Y., & Karakuzu, C. (2012). Levenberg-Marquardt Algoritması ile YSA Eğitiminin Donanımsal Gerçeklenmesi. Dergi Park, Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi, Archive, Volume 5, Issue 1.
- Ding, Z. (2007). A Static Traffic Assignment Model Combined with an Artificial Neural Network Delay Model. Ph.D. thesis. Florida International University, Miami, Florida, USA.
- Doğan, E., Akgüngör, A.P., & Arslan, T. (2016). Estimation of Delay and Vehicle Stops at Signalized Intersections Using Artificial Neural Network. Engineering Review, Vol. 36, Issue 2, 157-165.
- Doğan, F., & Türkoğlu, İ. (2018). Derin Öğrenme Modelleri ve Uygulama Alanlarına İlişkin Bir Derleme. DÜMF Mühendislik Dergisi 10:2 (2019): 409-445.
- Esen, M.F., & Timor, M. (2019). Çok Değişkenli Aykırı Değer Tespiti için Klasik ve Dayanımlı Mahalanobis Uzaklık Ölçütleri: Finansal Veri ile Bir Uygulama. Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi UIİİD-IJEAS, 2019 (25):267-282 ISSN 1307-9832.
- Garshasebi, B. (2018). Machine Learning Based Vehicle Delay Prediction at Signalized Intersections. M.Sc. thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, USA.
- Gundogan, F., Karagoz, Z., Kocyyigit, N., Karadag, A., Ceylan, H., & Murat, Y. S. (2014). An Evolution of Adaptive Traffic Control System in Istanbul, Turkey. J Traffic Logist Eng, 2 (3), 198-201.
- Harb, A.A.M., Durdu, A., & Terzioğlu, H. (2019). Kavşak Trafik Sinyalizasyon Kontrolü için Bulanık Mantık Yöntemi ile Gerçek Zamanlı Sistemin Tasarımı ve Uygulaması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Özel Sayı, S. 490-497, Ekim 2019.
- Hasiloğlu, A.S., Gökdağ, M., & Karlı, N. (2014). Comparison an artificial intelligence-based model and other models signalized intersection delay estimates. International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT) Volume 4, Issue 3.
- HCM,(2000).Transportation Research Board, National Research Council, Highway Capacity Manual, Transportation Research Board Publications, Washington DC.
- <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/trainingoptions.html> (Erişim tarihi:31.10.2020)
- Jin, J., & Ma, X. (2015). Adaptive Group-Based Signal Control By Reinforcement Learning. Transportation Research Procedia 10 (2015) 207-216.
- Katanalp, B.Y., Yıldırım, Z.B., Eren, E., & Uz, V.E. (2018). Akıllı Ulaşım Sistemleri Üzerine Bir Değerlendirme. Second International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies, November 30 – December 2, 2018, Samsun, Turkey. SETSCI Conference Indexing System, Volume 3 (2018), 1503-1506.
- Kim, P. (2017). MatLab Deep Learning with Machine Learning, Neural Networks and Artificial Intelligence. Apress, Seoul, Korea.

- Korkmaz, E. (2016). Yapay Zeka Teknikleri Kullanılarak Sinyalize Kavşaklarda Gecikme Modelleri. Yüksek Lisans Tezi. Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.
- Manandhar, B., & Joshi, B. (2018). Adaptive Traffic Light Control with Statistical Multiplexing Technique and Particle Swarm Optimization in Smart Cities. IEEE 3rd International Conference on Computing, Communication and Security, Kathmandu – Nepal, 210-217.
- Masouleh, A.S. (2017). Adaptive Traffic Signal Optimization Using Bluetooth Data. Ph.D. thesis. University of Waterloo, Ontario, Canada.
- Murat, Y.Ş. (2006). Sinyalize Kavşaklardaki Taşıt Gecikmelerinin Bulanık Mantık ile Modellenmesi. İMO Teknik Dergi, 2006 3903 -3916, Yazı 258.
- Murat, Y.Ş. (2006). Comparison of Fuzzy Logic and Artificial Neural Networks Approaches in Vehicle Delay Modeling. Transportation Research Part C 14 (2006) 316–334.
- Mutlu, E., & Yavuz, M.E. (2008). Bulanık Mantık ve Yapay Sinir Ağı ile Sinyalize Kavşaklardaki Taşıt Gecikmelerinin Modellenmesi. Electronic Letters on Science & Engineering, vol. 4(2), pg. 11-18. <http://e-lse.org>.
- Ocakdan, S. (2010). Arterlerin Yeniden Yapılandırılmasında Simülasyon Tekniği ile Karar Verme ve Bir Kavşak Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Odeh, S. M., Mora, A. M., Moreno, M. N. & Merelo, J. J. (2015). A Hybrid Fuzzy Genetic Algorithm for an Adaptive Traffic Signal System. Adv Fuzzy Syst, Article ID: 378156, 1-11.
- Özdağ, M.E. (2019). Derin Öğrenme Teknikleri Kullanılarak Anayol Trafik Analizi. Yüksek Lisans Tezi. Karabük Üniversitesi, Karabük.
- Öztemel, E. (2006). Yapay Sinir Ağları. Papatya Yayıncılık, İstanbul.
- Preethi, P., Aby, V., & Ashalatha, R. (2016). Modelling Delay at Signalized Intersections Under Heterogeneous Traffic Conditions. Transportation Research Procedia 17 (2016), 529 – 538.
- Qiao, F., Yi, P., Yang, H., & Devarokonda, S. (2002). Fuzzy Logic Based Intersection Delay Estimation. Pergamon Mathematical and Computer Modelling. 36 (2002) 1425-1434, <http://elsevier.com/locate/mcm>.
- Roess, P.R., Prassas, S.E., & McShane, R.W. (2011). Traffic Engineering, Fourth Edition, Pearson Higher Education Inc, USA.
- Samadi, S., Rad, A. P., Kazemi, F. M., & Jafarian, H. (2012). Performance Evaluation of Intelligent Adaptive Traffic Control Systems: A Case Study. Open J Transp Technol, 2, 248-259.
- Shoufeng, L., Ximin, L., & Shiqiang, D. (2008). Q-Learning for Adaptive Traffic Signal Control Based on Delay Minimization Strategy. 2008 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, Sanya – China, 687-691.
- Studer, L., Ketabdari, M., & Marchionni, G. (2015). Analysis of Adaptive Traffic Control Systems Design of a Decision Support System for Better Choices. J Civil Environ Eng, 5 (6), 1-10.
- Siregar, S.P., & Wanto, A. (2017). Analysis Accuracy of Artificial Neural Network Using Backpropagation Algorithm In Predicting Process (Forecasting). International Journal Of Information System & Technology Vol. 1, No. 1, (2017), pp. 34-42.
- Şeker, A., Diri, B., & Balık, H.H. (2017). Derin Öğrenme Yöntemleri ve Uygulamaları Hakkında Bir İnceleme. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2017, 3(3): 47-64, Gazi Akademi Yayıncılık, Ankara.
- Tektaş, M., Akbaş, A., & Topuz, V. (2002). Yapay Zeka Tekniklerinin Trafik Kontrolünde Kullanılması Üzerine Bir İnceleme. Uluslararası Trafik ve Yol Güvenliği Kongresi ve Fuarı, Ankara. <http://kadirgurbetci.com.tr/yonetim/dosya/0444e4fab9hnc.pdf> (Erişim tarihi:31.10.2020)
- Webster, F. (1958). Traffic Signal Settings. HMSO, London.
- Wu, S., Bi, Y., Wang, G., Ma, Y., Lu, M., & Xu, K. (2019). Adaptive Fuzzy Logic Traffic Signal Control Based on Cuckoo Search Algorithm. International Symposium for Intelligent Transportation and Smart City (ITASC) 2019, Singapore – Singapore, 107-117.
- Yulianto, B., & Sutanto, B. (2014). Adaptive Traffic Signal Control for Mixed Traffic Conditions. 1st International Conference on Engineering Technology and Industrial Application, Surakarta – Indonesia, 111-116.



Al Matrisli Kompozitlere ANFIS, ANN ve Taguchi Yaklaşımları Uygulanarak Özelliklerin Karşılaştırılması

Comparison of Properties by Applying ANFIS, ANN and Taguchi Approaches to Al Matrix Composites

Engin Ergül¹ , Halil İbrahim Kurt² 

¹Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 35380 İzmir, TÜRKİYE

²Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 27310 Gaziantep, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 30/11/2020

Kabul / Accepted: 07/02/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 15/02/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Metal matris kompozitler havacılık, savunma sanayii, otomobiller ve diğer önemli yapısal uygulamalar gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum ve alaşımları hafifliği yanı sıra sağlamlığı ve kolay şekillendirilebilme özellikleri sayesinde endüstride giderek artan kullanım alanına sahip olmuştur. Alüminyum matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak Al₂O₃, SiC, TiC, MgO, CNT ve B₄C yaygın olarak kullanılır. Bu çalışmada, Al-bazlı metal matris kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemek için matematiksel ve sonlu eleman modellemesi kullanılmıştır. Basınç, sinterleme sıcaklığı ve sinterleme süresine bağlı kalarak porozite içeriği uyarlanabilir nöro-bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) yöntemi kullanılarak relatif yoğunluklar ise yapay sinir ağları (ANN) yöntemi ile başarılı bir şekilde analiz edilmiştir. ANFIS yaklaşımında, dört giriş parametresi, ağırlıkça %SiC oranı, kullanılan basınç (MPa), sinterleme sıcaklığı (°C), sinterleme zamanı (dk) ve bir çıkış parametresi porozite (%) oranı kullanılmıştır. Analizlerin korelasyon katsayılarının ve istatistiksel hata oranlarının iyi olduğu görülmüştür. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen Al-Mg-Al₂O₃ kompozitlerin relatif yoğunluk değerleri ANN yöntemiyle incelenmiştir. Sistemin tahmin oranının %81 ve kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu söylenebilir. Ayrıca, Taguchi yaklaşımı ile Al₂O₃ ve SiC içeren kompozitlerin relatif yoğunlukları analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Alüminyum matris kompozit, SiC, Al₂O₃, ANFIS, ANN”

Abstract

Metal matrix composites are widely used in various fields such as aerospace, defense industry, automobiles and other important structural applications. Aluminum and its alloys have been increasingly used in the industry thanks to their lightness, strength and easy formability. Al₂O₃, SiC, TiC, MgO, CNT and B₄C are widely used as reinforcing elements in aluminum matrix composites. In this study, mathematical and finite element modeling was used to examine the mechanical properties of Al-based metal matrix composites. Based on the pressure, sintering temperature and sintering time, the relative densities were successfully analyzed using the adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) method and the artificial neural networks (ANN) method. In the ANFIS approach, four input parameters, weight %SiC ratio, used pressure (MPa), sintering temperature (°C), sintering time (min) and one output parameter porosity (%) ratio were used. Correlation coefficients and statistical error rates of the analyzed dataset were found to be good. The relative density values of Al-Mg-Al₂O₃ composites produced by powder metallurgy method were examined by ANN method. It can be said that the estimation rate of the system is 81% and that it is within acceptable limits. Besides, the relative density of composites with Al₂O₃ and SiC was examined using Taguchi method and the results were compared.

Key Words

“Aluminum matrix composite, SiC, Al₂O₃, ANFIS, ANN”

1. Giriş

En az iki farklı malzemenin belirli bir amaç için bir araya getirilmesiyle oluşan yapıya kompozit malzemeler adı verilir ve matris malzemesi olarak metal ve alaşımlarının kullanılmasıyla metal matris kompozitler (MMC) oluşur (Kurt vd. 2018). Metal matris kompozitler havacılık, savunma sanayii, otomobiller ve diğer önemli yapısal uygulamalar gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Şimşek 2019, Başyigit 2020). Metal matris kompozitler, lif gibi takviye ediciler ile doldurulmuş bir malzeme türüdür. Al matris kompozitler, yüzey merkezli kübik kafes yapıdadır, iyi bir plastiklik özelliğe ve tokluğa sahiptir. Buna ek olarak, işlenebilirlik, dayanım ve düşük fiyat avantajları nedeniyle mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılır. Hafif malzemenin yanı sıra yüksek sertlik ve mukavemet gerektiren havacılık sektöründe Mg matris kompozitler tercih edilir (Zhao vd. 2020, Baksan vd. 2020).

Metal matris kompozit üretiminde döküm, toz metalürjisi, in-situ ve infiltrasyon gibi farklı metotlar kullanılmaktadır. İnfiltrasyon metodu içerisinde birkaç farklı uygulama tekniği barındırır. Bunlar; basınçlı, basınçsız ve vakum infiltrasyon teknikleridir. Basınçlı infiltrasyon yöntemi; ön şekil verilmiş gözenekli takviyeye sıvı metalin nüfuz etmesi için, sıvı metale mekanik basınç yerine inert gaz basıncı uygulayan bir sıvı infiltrasyon tekniğidir. Basınçlı infiltrasyon tekniğinde; sıvı metal sıcaklığı, takviye tane büyüklüğü, infiltrasyon süresi ve basıncı en önemli infiltrasyon parametrelerini teşkil ederler ve sıvı metal sıcaklığı bu parametrelerin en önemlilerinden birisidir (Ateş ve Kızılok 2011).

Alüminyum ve alaşımları hafifliği yanı sıra sağlamlığı ve kolay şekillendirilebilme özellikleri sayesinde endüstride giderek artan kullanım alanına sahip olmuştur (Pul 2017, Uludağ 2018, Hekimoğlu ve Hacıosmanoğlu 2019, Kurt vd. 2019). Alüminyum alaşımlarının zayıf olan mekanik özelliklerini geliştirmek için alüminyum matrise makro boyutta dayanımı yüksek takviye elemanları değişik üretim yöntemleri ile ilave edilerek çok üstün özelliklere sahip alüminyum esaslı kompozit malzemeler üretilmektedir (Karabulut vd. 2019). Alüminyum matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak Al₂O₃, SiC, TiC, MgO, CNT ve B₄C yaygın olarak kullanılır (Gosavi ve Jaybhaye 2020, Kaya vd. 2020). MMC'ler yumuşak alaşımlı matris üzerine sert ve kırılğan takviyenin birleşik etkisiyle elde edilen gelişmiş fiziksel ve mekanik özelliklere sahip alaşımdır. Kullanılan takviye türüne ve metal matris içindeki hacim oranına bağlı olarak, alüminyum metal matris kompozitler daha büyük mukavemet, sertlik, aşınma direnci, yorulma, korozyon ve sürünme direnci değerleri elde edilebilir.

Kompozit malzemelerin karakterizasyonu, güvenilir kullanımları için esastır. En güçlü modelleme tekniklerinden biri olan Yapay Sinir Ağları (ANN) ve Uyarlanabilir Nöro-bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) kullanımı, gerekli deneysel ölçümlerin zamanını ve maliyetini düşürür (Fazilat vd. 2012). Bu bağlamda kompozit malzemelerin karakterizasyonu ile ilgili literatür çalışmalarına bakıldığında; Jalham (2005), Al bazlı kompozitlerde takviye içeriğinin sıcak mukavemeti üzerindeki etkisini tahmin etmek için karşılaştırmalı ağ yaklaşımları üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemeler sonunda nöro-bulanık ağı, ortalama parçacık boyutu 25µm olan Al₂O₃ parçacıklarının farklı takviye içeriğine (%5, 10, 15 ve 20) sahip Al-bazlı kompozitlerin sıcak deformasyon davranışını tahmin etmek için en iyi araç olduğunu vurgulamıştır. Çalışmasında Al₂O₃'ün içeriği arttıkça akma dayanımının azaldığını ifade etmektedir. Azmi (2015) frezelemede cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) kompozitleri işlemenin zor ve aşırı takım aşınmasına neden olduğunu vurgulamaktadır. Çalışmasında işleme kuvvetinin ve takım aşınmasının büyümesini sürekli olarak izlemiştir. İki farklı ANFIS modeli geliştirilmiştir. (Al-Ghamdi ve Taylan 2015) Ti – 6Al – 4V alaşımı üzerinde EDM (elektro-erozyon) deneyinin sonuçları üzerinde ANFIS modellemesi gerçekleştirmiştir. Geri yayılım sinir ağları eğitim algoritması ile birinci dereceden Sugeno bulanık yaklaşımı kullanılarak 6, 9, 19, 21 ve 51 kurallı beş ANFIS modeli geliştirmişlerdir. Bunlardan 21 kurallı ANFIS modelinin en iyisi olduğunu vurgulamaktadır. Bu model ayrıca, tahmin hatası, kalıntı aralığı, deneysel ve öngörülen MRR değerleri arasındaki korelasyon katsayısı açısından polinom modelinden önemli ölçüde daha iyi performans gösterdiğini ifade etmektedirler. Çalışma, karmaşık doğrusal olmayan işleme süreçlerinin modellenmesi açısından ANFIS modellerinin güçlü öğrenme kapasitesine ve geleneksel polinom modellerine göre üstünlüğüne ışık tuttuğunu söylemektedirler. Kumarasamy vd. (2017) çalışmalarında, iki aşamalı birleştirme yoluyla geliştirilen yeni bir hibrit Alüminyum Metal Matris Kompozitin (AMMC) karakterizasyonuna odaklanmışlardır. Geliştirilen hibrit kompozitin işlenebilirlik (tornalama) özellikleri, Yapay Sinir Ağı (YSA) tekniği kullanılarak işleme parametrelerinin optimize edilmesinin yanı sıra ayrıntılı olarak incelemişlerdir. ANOVA sonuçlarına göre, kesme hızının ve grafit ilavesinin %'sinin, geliştirilen kompozitin yüzey pürüzlülüğünü en aza indirmede büyük katkısı olduğunu bulmuşlardır.

Bu alışmada, Al-bazlı metal matris kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemek için matematiksel ve sonlu eleman modellemesi kullanılmıştır. Basınç, sinterleme sıcaklığı ve sinterleme süresine bağlı olarak porozite içeriği ANFIS yöntemi kullanılarak relatif yoğunluklar ise ANN yöntemi ile başarılı bir şekilde analiz edilmiştir.

2. Malzeme ve Yöntem

2.1. Yapay sinir ağları (ANN)

Yapay sinir ağları (ANN), genellikle bu tür sistemleri tanımlamak için matematiksel modeller bulmanın zor veya imkânsız olduğu sistemlerin veya süreçlerin girdi çıktı ilişkilerini modellemede kullanılan hesaplama modelleme araçlarıdır. ANN, canlı organizmaların beyinlerindeki akıllıca hareket etmelerini sağlayan nöron ağından esinlenmiştir. Yapay sinir ağları yapay nöronlardan yararlanır. Yapay sinir ağları (ANN), insan vücudundaki doğal nöronların çalışma şeklini simüle eder. Çoğu ANN, ileri beslemeli çok katmanlı algılayıcı

ağlardır. İleri beslemeli ağlar, öğrenme için geriye doğru yayılma algoritmaları kullanır. Bazı öğrenme algoritmaları arasında Levenberg – Marquardt algoritması, gradyan iniş algoritması, genetik algoritma veya diğer doğal optimizasyon algoritmaları bulunur. ANN, nöronları temsil eden birkaç düğümden oluşur. Giriş düğümleri bağımsız değişkenleri temsil ederken, çıkış düğümleri bağımlı değişkenleri temsil eder (Nwobi-Okoye vd. 2019).

Bu çalışmada SiC ile güçlendirilen ve toz metalürjisi yöntemiyle üretilen alüminyum-magnezyum matrisli kompozitlerin relatif yoğunluk değerlerini doğru bir şekilde modellemek için ANN kullanıldı. Herhangi bir sürecin parametrelerinin doğru tahmin edilmesi, sürecin kalitesi, ekonomisi ve optimum performansı için kritiktir. Tatmin edici bir ANN modeli geliştirildikten sonra, model, relatif yoğunluk parametrelerinin çok amaçlı optimizasyonu için uygunluk işlevi olarak genetik algoritma olarak bilinen bir optimizasyon prosedürüne entegre edildi. ANN, Matlab ile geliştirildi. ANN girdileri basınç, sinterleme sıcaklığı ve sinterleme süresinden oluşur.

2.2. Uyarlanabilir nöro-bulanık çıkarım sistemi (ANFIS)

ANFIS, bir sinir ağının öğrenme yeteneklerini ve bulanık mantığın akıl yürütme yeteneklerini birleştiren düğümler ve yönlü bağlantılardan oluşan çok katmanlı ileri beslemeli bir ağıdır. Ağın bu hibrit yapısı, ANFIS'in tahmin yeteneklerini ANN'nin ve tek başına kullanıldıklarında bulanık mantık tekniklerinin ötesine genişletme olasılığına sahiptir. ANFIS, girdi ve çıktı verileri arasındaki eşleştirme ilişkisini analiz ederek, ortalama mutlak hatayı en aza indirecek işlevlerinin optimal dağılımını, tek başına bir geri yayılım gradyan iniş algoritması veya en küçük kareler yöntemiyle kombinasyon halinde belirleyebilir (Nwobi-Okoye vd. 2019, Said vd. 2020). Bu çalışmada kullanılan ANFIS MATLAB ile geliştirilmiştir.

2.3. Porozite ve relatif yoğunluk ölçümleri

Bu çalışmada SiC ile güçlendirilen ve toz metalürjisi yöntemiyle üretilen alüminyum-magnezyum matrisli kompozitlerin porozite içeriği incelenmiştir ve ANFIS yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Ayrıca Al₂O₃ ile güçlendirilen alüminyum-magnezyum matrisli kompozitlerin relatif yoğunluk değerleri incelenerek yapay sinir ağları yöntemiyle analiz edilmiştir. Kompozitlerin teorik yoğunlukları, Arşimet prensibine göre değerlendirilmiştir.

$$d_{ölçülen} = \frac{W_k}{W_k - W_a} \cdot 0,998$$

W_k = havadaki ağırlık

W_a = sudaki ağırlık

d_{teorik} = karışım kanunu

Teorik yoğunluklar ve ölçülen yoğunluklar kullanılarak porozite değerleri hesaplanmıştır.

$$\%Porozite = \left(1 - \frac{d_{ölçülen}}{d_{teorik}}\right) \cdot 100$$

Ölçülen yoğunluklar ve hesaplanan yoğunluklar kullanılarak relatif yoğunluk değerleri hesaplanmıştır.

$$d_{relatif} = \frac{d_{ölçülen}}{d_{teorik}}$$

SiC ile güçlendirilen ve toz metalürjisi yöntemiyle üretilen alüminyum-magnezyum matrisli kompozitlerin porozite içeriği ANFIS yöntemi kullanılarak relatif yoğunluklar ise ANN yöntemi ile analiz edilmiştir. Porozite içeriğinin analizinde kullanılan ANFIS giriş ve çıkış parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Porozite içeriğinin analizinde kullanılan ANFIS parametreleri

	SiC Oran (%)	Basınç (MPa)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (dk)	Porozite (%)
Min	15	260	300	30	22,87
Maks	30	520	500	90	44,51

SiC ile güçlendirilen ve toz metalürjisi yöntemiyle üretilen alüminyum-magnezyum matrisli kompozitlerin relatif yoğunlukların analizinde kullanılan ANN giriş ve çıkış parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

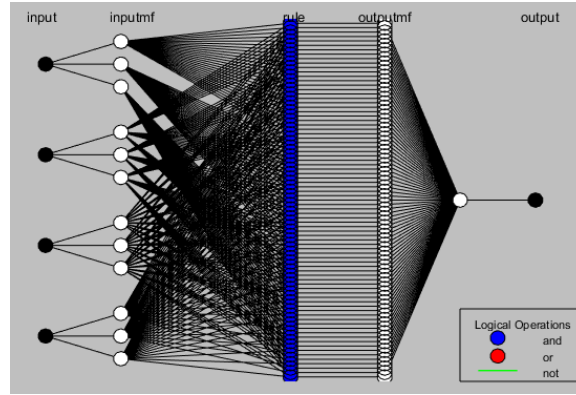
Tablo 2. Relatif yoğunlukların analizinde kullanılan ANN parametreleri

	Al ₂ O ₃ Oranı (%)	Basınç (MPa)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (dk)	Relatif Yoğunluk
Min	15	260	300	30	0,85
Maks	30	520	500	90	0,93

3. Bulgular ve Tartışma

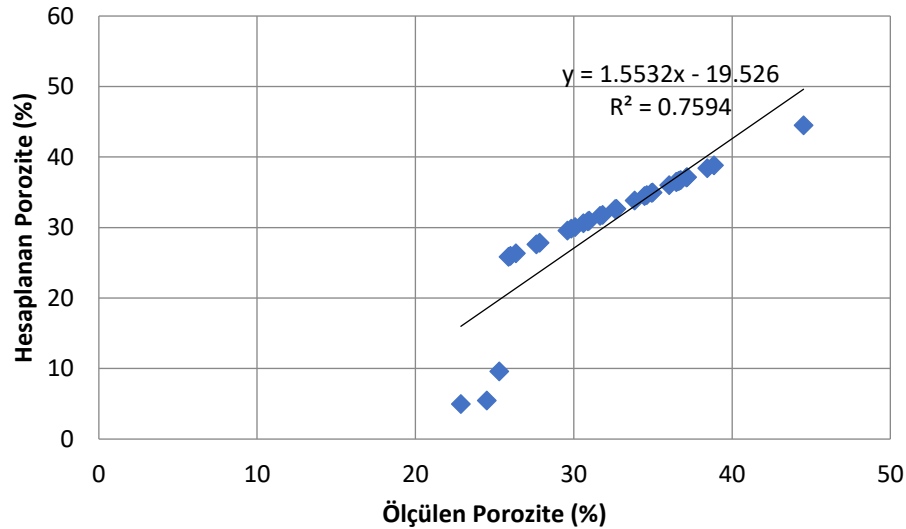
3.1. ANFIS Sonuçları

ANFIS programında, 4 giriş değişkeni, 1 çıkış değişkeni, giriş fonksiyon tipi (mf) gaussmf, fonksiyon numarası 3 3 3 3, çıkış fonksiyon tipi sabit, öğrenme algoritması (FIS) hibrit, epoch 1000, hata toleransı 0 olarak ayarlanmıştır. Sistem sonuçları, ortalama karesel hata (MSE), ortalama mutlak hata (MAE), ortalama mutlak hata yüzdesi (MAPE) ve korelasyon katsayısı (R) ve tahmin oranı (R²) kullanılarak değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Sistem yapısı

Şekil 1’de sistem yapısı gösterilmiştir. Burada 4 giriş parametresi, ağırlıkça %SiC oranını, kullanılan basıncı (MPa), sinterleme sıcaklığını (°C), sinterleme zamanını (dk) ve bir çıkış parametresi porozite (%) oranını temsil etmektedir.



Şekil 2. Porozite içeriğinin karşılaştırılması ve uyumu

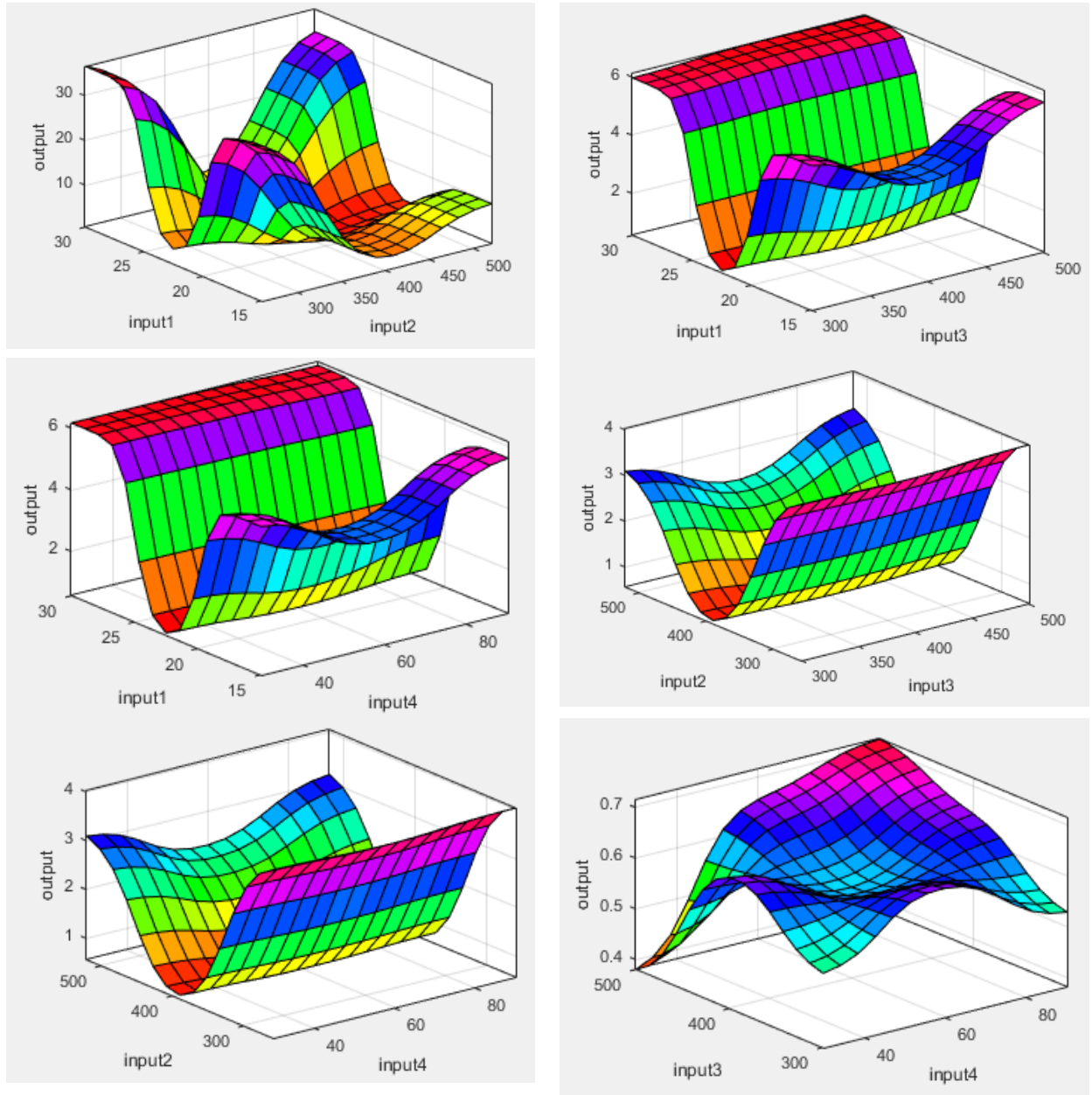
Şekil 2’de ölçülen ve hesaplanan porozitelere ait uyum gösterilmiştir. Ölçülen ve hesaplanan porozitelere ait korelasyon katsayısı R=0,87 ve R² değeri 0,7594 olarak meydana gelmiştir. Bir başka ifadeyle sistemin tahmin oranı yaklaşık olarak %75 olduğu görülmektedir.

Tablo 3'te sisteme ait istatistiksel ortalama hatalara ait veriler görülmektedir. Elde edilen istatistik sonuçlarının oldukça iyi olduğu saptanmıştır. Sistem parametreleri değiştirilerek daha düşük hata değerleri elde edilebilir ve dolayısıyla tahmin oranı artırılabilir. Buna rağmen, üretim esnasındaki bütün değişimleri kontrol etmek mümkün olmadığı için sıfır hatayla bir sonuç elde etmek çok zordur.

Tablo 3. İstatistik analiz sonuçları

MSE	MAE	MAPE
27,28	1,55	6,41

ANFIS yüzey modelleme ile parametreler arasındaki ilişkiler grafik olarak incelenebilmektedir. Yüzey grafikleri bu ilişkileri net bir şekilde ifade edebilmektedir.



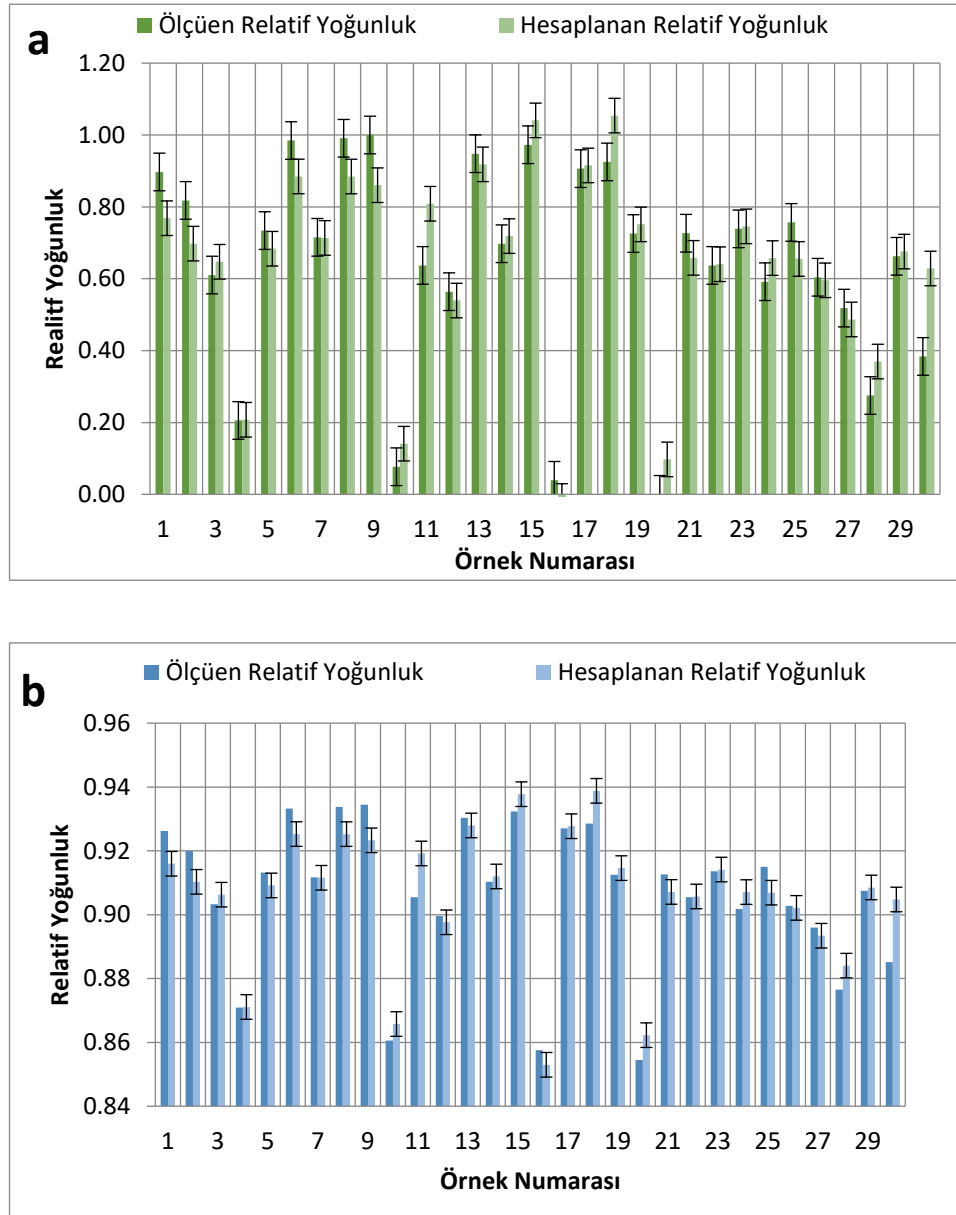
Şekil 3. Değişkenlere ait yüzey grafiği

Şekil 3'te ANFIS programı kullanılarak elde edilen yüzey grafikleri verilmiştir. Bu grafikler ile giriş değişkenlerinin birbiri üzerindeki etkileri ve sonuç üzerindeki etkileri değerlendirilebilir. Burada input 1 ağırlıkça %SiC oranını, input 2 kullanılan basıncı (MPa), input 3 sinterleme sıcaklığını (°C), input 4 sinterleme süresini (dk) ve output porozite (%) oranını temsil etmektedir. Genelde lineer bir görüntü elde edilmemekle birlikte farklı değişkenlerin birbiri üzerine etkileri farklı karakteristikler sergilemektedir. Sinterleme sıcaklığı, süresi ve basınç artışı bir dereceye kadar porozite içeriğini azalttığı sonucuna varılabileceği kanaati oluşmaktadır.

3.2. ANN Sonuçları

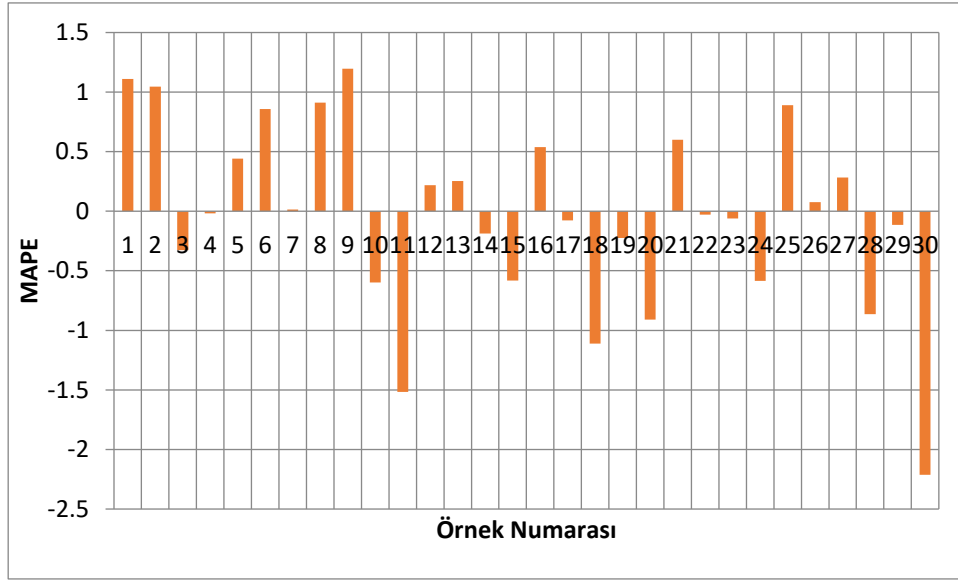
Yapay sinir ağları (YSA), sistemlerin parametrelerin değişikliklere nasıl tepki vereceğini tahmin edebilecekleri için karmaşık sistemleri modellemede yararlı araçlardır. Ayrıca, değişkenler arasındaki ilişkileri keşfetmek için YSA'lar kullanılabilir ve bu da sistem işlevinin anlaşılmasına yardımcı olur. YSA'lar insan sinir sistemini simüle eder ve giriş verileri hata içerdiğinde veya eksik olduğunda bile anlamlı çözümler üretmek için örneklerden öğrenip genelleme yapabilir. YSA'nın hesaplanması, işlemlerin giriş katmanına bir dizi eklenmesiyle başlar. Bu sinyaller daha sonra bitişik katmandaki nöronların her birine bağlantılar boyunca bağlantıya özgü ağırlıklar ile hareket eder. Bitişik katman nöronlar, gelen sinyaller için toplama aygıtıdır. Gelen sinyal daha sonra bir çıkış sinyaline dönüştürülür. Bu çıkış sinyali daha sonra ağırlıklı bağlantılar boyunca aşağıdaki nöron katmanına taşınır. İşlem, sinyal çıkış katmanına ulaşana kadar tekrarlanır. Çıkış sinyali daha sonra YSA'nın verilen giriş uyarısına tepkisi olarak yorumlanabilir.

Tablo2'de kullanılan değerler 0-1 aralığında $=(\text{maks}-\text{min})/\text{fark}$ ile normalize edilmiştir. Yapay sinir ağları yaklaşımında verilerin %80 eğitim geri kalanı test verisi olarak ayarlanmıştır. Yapay sinir ağlarında 4 giriş ve 1 sonuç verileri, 1 gizli tabaka içinde 10 nöron yapısı ile Sigmoid LM aktivasyon fonksiyonu ileri beslemeli geri yayılım kullanılmıştır.



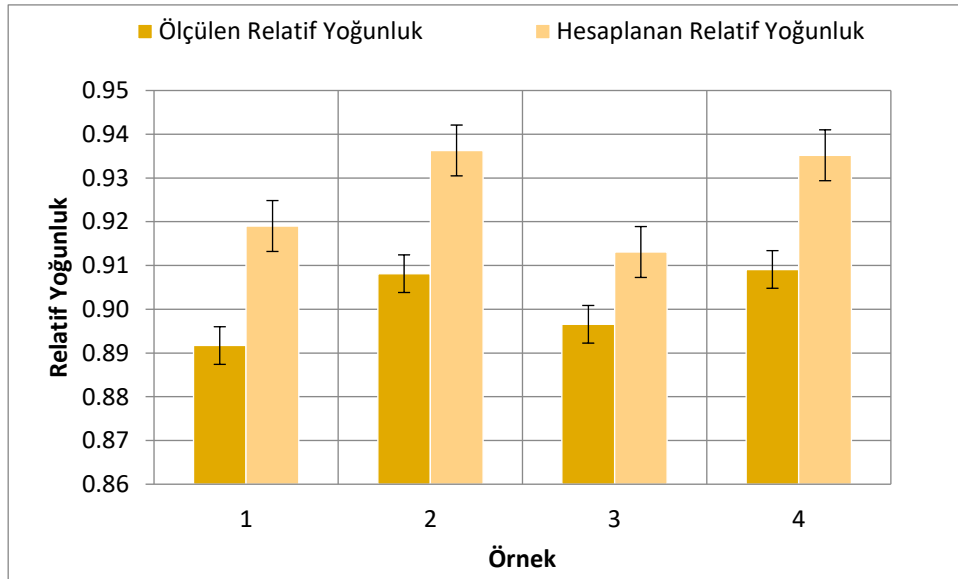
Şekil 4. Eğitim setine ait uyum a) Normalize edilmiş b) Normalize edilmemiş

Yapay sinir ağırları yaklaşımında eğitim setine ait ölçülen ve hesaplanan yoğunluk değerlerinin uyumu Şekil 4'te gösterilmiştir. Normalize edilmiş sonuçların uyumu ile normalize edilmemiş örneğe ait uyumun her ikisinin de yüksek olduğu saptanmıştır. Her iki sonucun korelasyon değerlerinin $R=0,95$ olması bu varsayımı doğrulamaktadır (Jajarmi vd. 2019).



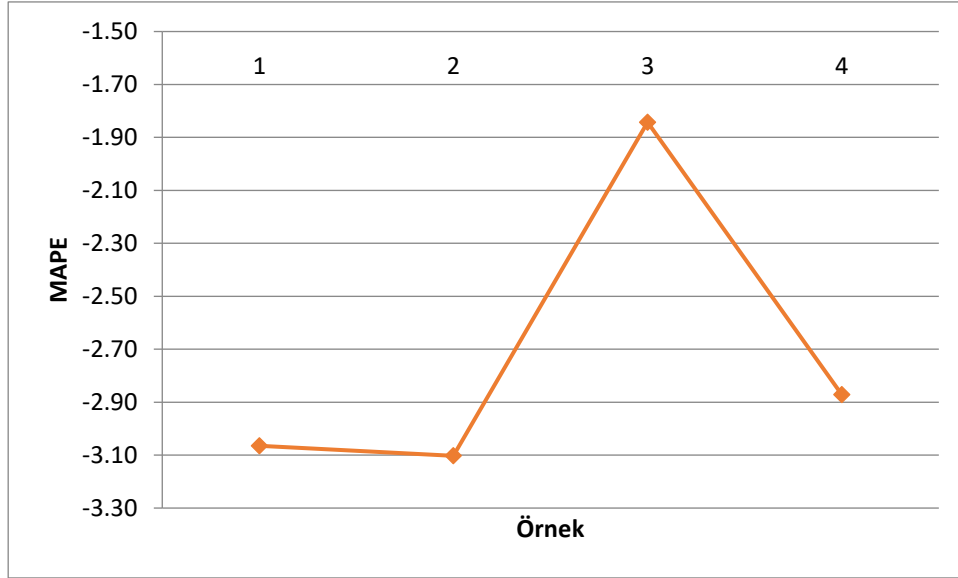
Şekil 5. Eğitim setine ait yüzde hata değişimi

Yapay sinir ağırları yaklaşımında sistemin analizi ortalama karesel hata (MSE), ortalama mutlak hata (MAE) ve ortalama mutlak hata yüzdesi (MAPE) kullanılarak değerlendirilmiştir. Eğitim testine ait normalize edilmemiş sonuçların; ortalama karesel hata (MSE) 0,00005, ortalama mutlak hata (MAE) 0,0054 ve ortalama mutlak hata yüzdesi (MAPE) ise -0,0325 olarak tespit edilmiştir. Şekil5'te yüzde hata değişimi verilmiştir. Maksimum yüzde hata %2,5'i geçmemiştir. Buda analiz sonuçlarının doğruluğunu ve güvenilirliğini göstermektedir.



Şekil 6. Normalize edilmemiş test setine ait uyum

Normalize edilmemiş test setine ait ölçülen ve hesaplanan yoğunluk değerlerinin uyumu Şekil 6'da gösterilmiştir. Test setine ait korelasyon değerinin $R=0,899$ olması sisteme ait uyumun yüksek olduğunu göstermektedir. Test testine ait normalize edilmemiş sonuçların ortalama karesel hata (MSE) 0,0006 ortalama mutlak hata (MAE) 0,025 ortalama mutlak hata yüzdesi (MAPE) ise -2,72 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 7. Test setine ait yüzde hata değişimi

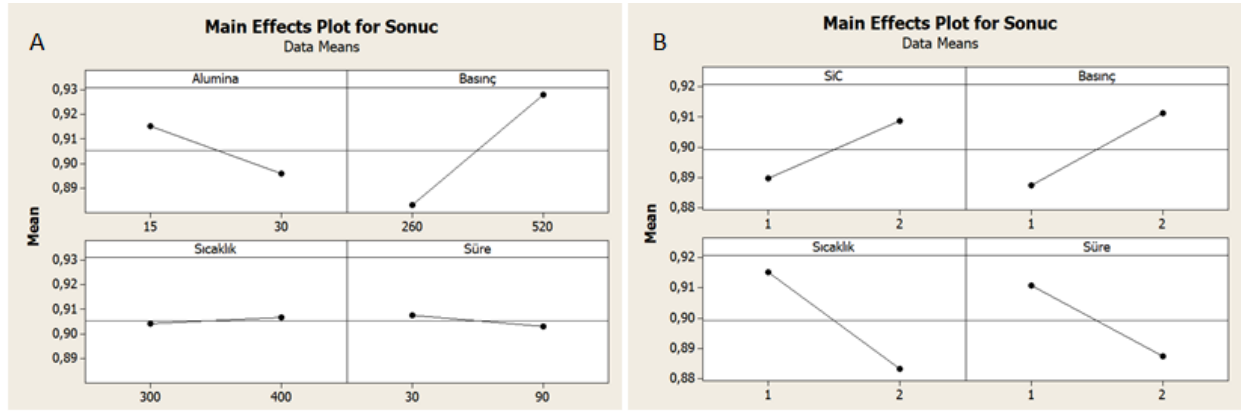
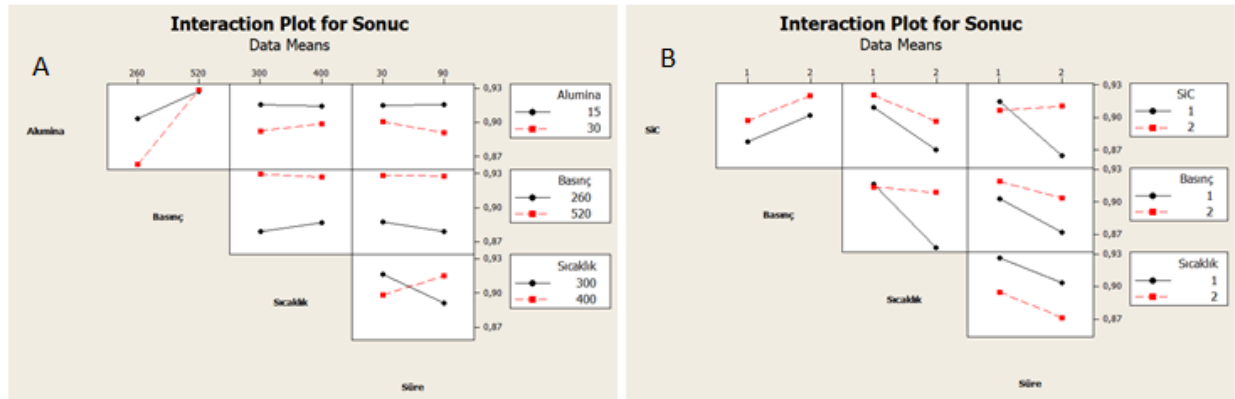
Şekil 7’de yüzde hata değişimi verilmiştir. Maksimum yüzde hata %3,5’i geçmemiştir. Buda analiz sonuçlarının doğruluğunu ve güvenilirliğini göstermektedir. Bütün yapılan sonuçlar değerlendirildiğinde yapay sinir ağları yaklaşımının verilen parametreler ışığında tahmin oranının (R2) yaklaşık %81 ve yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

3.3. Taguchi Sonuçları

Bu bölümde, üretilen kompozitlerin relatif yoğunluk değerleri verilen parametreler ışığında Taguchi yaklaşımı kullanılarak incelenmiştir. Taguchi metodunda, 2 seviye, 4 faktör ve L8 ortogonal ara yüzü kullanılmıştır. Tablo 4’te, SiC ve alümina içeren kompozitlerin Taguchi deney parametreleri ve relatif yoğunluk değerleri verilmiştir. Farklı deney sonuçlarına bağlı olarak farklı yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Relatif yoğunluk değerleri, porozite içeriğini değiştirdiğinden kompozitlerin mekanik özelliklerini de etkilemektedirler (Kurt 2016).

Tablo 4. Taguchi yaklaşım parametreleri ve relatif yoğunluk değerleri

Al ₂ O ₃ /SiC (%)	Basınç (MPa)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (dk)	Relatif Yoğunluk (Al ₂ O ₃)	Relatif Yoğunluk (SiC)
15	260	300	30	0,903294947	0,922541754
15	260	400	90	0,902808696	0,832260820
15	520	300	90	0,928479906	0,896632786
15	520	400	30	0,926243810	0,907185257
30	260	300	90	0,854465266	0,910912861
30	260	400	30	0,870908400	0,883018508
30	520	300	30	0,930306451	0,930828293
30	520	400	90	0,926982137	0,910266966

Şekil 8. Giriş parametrelerinin relatif yoğunluğa ortalama etkisi a) Al₂O₃ b) SiCŞekil 9. Relatif yoğunluğun deney parametreleri ile etkileşimi a) Al₂O₃ b) SiC

Şekil 8 ve 9’da giriş parametrelerinin relatif yoğunluk üzerine etkileri ve etkileşimi yarı ayrı verilmiştir. Alümina içeriğinde artışa bağlı olarak kompozitlerin relatif yoğunluk değerleri azalırken SiC içeriğindeki artışa bağlı olarak relatif yoğunluklar artmıştır. Basınc değerindeki artış hem alümina hem de SiC içeren kompozitlerin relatif yoğunluk değerini arttırmıştır. Bu daha iyi sıkıştırılabilirlik etkisine dayandırılabilir. Bununla beraber, giriş parametrelerinin “Delta ve Rank” istatistikleri verilmiş ve Regresyon analizi yapılmıştır. Tablo 5 ve 6’da bu değerler sunulmuştur.

Tablo 5. Alümina içeren kompozitlerin Taguchi istatistikleri

Level	Al ₂ O ₃	Basınc	Sıcaklık	Süre
1	0,9152	0,8829	0,9041	0,9077
2	0,8957	0,9280	0,9067	0,9032
Delta	0,0195	0,0451	0,0026	0,0045
Rank	2	1	4	3
P	0,219	0,037	0,850	0,745

Tablo 6. SiC içeren kompozitlerin Taguchi istatistikleri

Level	SiC	Basınc	Sıcaklık	Süre
1	0,8897	0,8872	0,9152	0,9109
2	0,9088	0,9112	0,8832	0,8875
Delta	0,0191	0,0240	0,0320	0,0234
Rank	4	2	1	3
P	0,325	0,236	0,143	0,246

Delta, her faktör için en yüksek ve en düşük ortalama yanıt değerleri arasındaki farktır ve bir faktör için en yüksek ve en düşük karakteristik ortalama arasındaki farkı olarak etkinin boyutunu kullanır. Rank, hangi faktörün en büyük etkiye sahip olduğunu belirlemek için kullanılır (Yılmaz vd. 2019). Delta ve Rank değerleri birbirinin etkileşimi olduğu açıktır. Alümina içeren kompozitlerde

Basınç en yüksek etkiye sahipken SiC içeren kompozitlerde Sıcaklık en yüksek etkiye sahiptir. Başka bir ifade ile basınç ve sıcaklıktaki herhangi bir değişim kompozitlerin relatif yoğunluk değerlerini diğer parametrelere göre daha fazla etkilemektedirler. Regresyon eşitliği alümina ve SiC içeren kompozitler için sırayla verilmiştir.

Relatif Yoğunluk (Alümina) = 0,862 - 0,00130 Alümina + 0,000174 Basınç + 0,000026 Sıcaklık - 0,000075 Süre

Relatif Yoğunluk (SiC) = 0,918 + 0,0191 SiC + 0,0240 Basınç - 0,0320 Sıcaklık - 0,0234 Süre

Tablo 5 ve 6'da verilen P değerleri sonuçları ölçen bir olasılık hipotezini göstermektedir. Düşük P değerleri daha güçlü bir olasılık kanıtı sağlamaktadır. Yani, P değerleri ile Rank değerleri birbirini doğrulamakta olduğunu söyleyebilir ve en küçük P değerleri daha yüksek etki oranına sahip olduğunu belirtebiliriz. Regresyon analizinde alümina içeren kompozitlerde P değeri 0,149 olarak gerçekleşirken SiC içeren kompozitleri için P değeri 0,251 olarak gerçekleşmiştir. Alümina içeren kompozitlerin Regresyon analizi SiC içeren kompozitlere göre daha yüksek uyumluluk göstermiştir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada toz metalürjisi yöntemiyle üretilen ve SiC ile güçlendirilmiş alüminyum-magnezyum matrisli kompozitlerin porozite içeriği ANFIS yöntemi kullanılarak incelenmiştir. ANFIS yaklaşımında, dört giriş parametresi, ağırlıkça %SiC oranını, kullanılan basıncı (MPa), sinterleme sıcaklığını (°C), sinterleme zamanını (dk) ve bir çıkış parametresi porozite (%) oranını kullanılmıştır. Analizlerin korelasyon katsayılarının ve istatistiksel hata oranlarının iyi olduğu görülmüştür. Her bir değişkenin birbiri üzerinde etkisinin olduğu ve bu değişkenlerin porozite içeriğini etkilediği görülmektedir.

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen Al-Mg-Al₂O₃ kompozitlerin relatif yoğunluk değerleri yapay sinir ağları yöntemiyle incelenmiştir. Ölçülen yoğunluklar ve teorik yoğunluklar kullanılarak relatif yoğunluk değerleri hesaplanmıştır. Eğitim ve test setlerine ait istatistiksel hata oranlarının çok düşük olduğu görülmüştür. Bununla birlikte setlere ait korelasyon değerlerinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Maksimum hata test setinde görülmüş olup bu değer %3,5'i aşmamıştır. Sistemin tahmin oranın %81 olduğu ve kabul edilebilir sınırlar içerisinde bulunduğu görülmektedir.

Teşekkür / Bilgilendirme

Bu çalışma, TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) tarafından 217M084 numaralı proje kapsamında desteklenmiş olup, TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

Referanslar

Al-Ghamdi, Khalid, and Osman Taylan. (2015). "A Comparative Study on Modelling Material Removal Rate by ANFIS and Polynomial Methods in Electrical Discharge Machining Process." *Computers & Industrial Engineering*, 79, 27–41. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.10.023>.

Ateş, Serkan, and Emel Kızılok. (2011). "Basınçlı İnfiltrasyon İle Üretilen SiC/Al₂O₃ Kompozitlerin Özelliklerine İnfiltrasyon Sıcaklığının Etkisinin Tek Yönlü Varyans Analizi İle İncelenmesi." *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 3(1), 50–54.

Azmi, A. I. (2015). "Monitoring of Tool Wear Using Measured Machining Forces and Neuro-Fuzzy Modelling Approaches during Machining of GFRP Composites." *Advances in Engineering Software*, 82, 53–64. doi: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2014.12.010>.

Baksan, Bedri, İbrahim Çelikyürek, and Yusuf Kılıç. (2020). "Effect of Secondary Aging of EN AC 43200 Aluminum Alloy to Mechanical Properties." *The International Journal of Materials and Engineering Technology*, 3(1), 16–20.

Başığit, Aziz Barış. (2020). "Investigating the Mechanical and Microstructural Properties of Aluminium Based Alloy Wheel Rims after TIG Welding." *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 12(2), 388–95. doi: [10.29137/umagd.686466](https://doi.org/10.29137/umagd.686466).

Fazilat, H., M. Ghatarband, S. Mazinani, Z. A. Asadi, M. E. Shiri, and M. R. Kalae. (2012). "Predicting the Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polymers via Artificial Neural Network and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System." *Computational Materials Science*, 58, 31–37. doi: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.01.012>.

Gosavi, Swapnil V, and M. D. Jaybhaye. (2020). "Microstructural Studies on Aluminium Metal Matrix Composite (Al7075-SiC) Fabricated through Stir Casting Process." *Materials Today: Proceedings*, doi: [10.1016/j.matpr.2020.05.094](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.094).

Hekimoğlu, Ali Paşa, and Murat Hacıosmanoğlu. (2019). "Effect of Copper and Magnesium Additions on the Structural, Mechanical

- and Tribological Properties of the Al-17Si Alloy.” *Uluslararası Mühendislik Arastırma ve Geliştirme Dergisi*, 11(2), 685–94. doi: 10.29137/umagd.546562.
- Jajarmi, E., S. A. Sajjadi, and J. Mohebbi. (2019). “Predicting the Relative Density and Hardness of 3YPSZ/316L Composites Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System and Support Vector Regression Models.” *Measurement*, 145, 472–79. doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.05.108>.
- Jalham, Issam S. (2005). “A Comparative Study of Some Network Approaches to Predict the Effect of the Reinforcement Content on the Hot Strength of Al-Base Composites.” *Journal of Materials Processing Technology*, 166(3), 392–97. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.08.028>.
- Karacif, Kubilay, Hasan Karabulut, and Ramazan Çıtak. (2019). “Al₂O₃ Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozit Malzemelerde Mekanik Alaşım Süresinin Korozyon Davranışına Etkilerinin İncelenmesi.” *Uluslararası Mühendislik Arastırma ve Geliştirme Dergisi*, 11(2), 576–83. doi: 10.29137/umagd.507023.
- Kaya, Abdulaziz, Mikail Aslan, Necip Fazıl Yılmaz, and Halil Kurt. (2020). “Al-Mg-SiC Kompozitlerin Görünür Yoğunluklarının Taguchi Analizi.” *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(2), 773–80. doi: 10.31202/ecjse.695249.
- Kumarasamy, Soorya Prakash, Kavimani Vijayananth, Titus Thankachan, and Gopal Pudhupalayam Muthukutti. (2017). “Investigations on Mechanical and Machinability Behavior of Aluminum/Flyash Cenosphere/Gr Hybrid Composites Processed through Compocasting.” *Journal of Applied Research and Technology*, 15(5), 430–41. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jart.2017.05.005>.
- Kurt, Halil İbrahim. (2016). “Influence of Hybrid Ratio and Friction Stir Processing Parameters on Ultimate Tensile Strength of 5083 Aluminum Matrix Hybrid Composites.” *Composites Part B: Engineering*, 93, 26–34. doi: 10.1016/j.compositesb.2016.02.056.
- Kurt, Halil İbrahim, Yahya Bozkurt, Serdar Salman, and Hüseyin Uzun. (2019). “Application of FSW Technique to AA2124/%25SiCp-T4 Aluminum Matrix Composites.” *The International Journal of Materials and Engineering Technology*, 2(1), 16–24.
- Kurt, Halil İbrahim, Necip Fazıl Yılmaz, and Murat Oduncuoğlu. (2018). “ANN in Estimation Shear Modulus of Laminate Composite.” *The International Journal of Materials and Engineering Technology*, 1(1), 1–5.
- Nwobi-Okoye, Chidozie Chukwumeka, Basil Quent Ochieze, and Stanley Okiy. (2019). “Multi-Objective Optimization and Modeling of Age Hardening Process Using ANN, ANFIS and Genetic Algorithm: Results from Aluminum Alloy A356/Cow Horn Particulate Composite.” *Journal of Materials Research and Technology*, 8(3), 3054–75. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.031>.
- Pul, Muharrem. (2017). “Comparison of Surface Roughness and Tool Wear in Turning of 7075, 6061 and 2024 Aluminum Alloys.” *Uluslararası Mühendislik Arastırma ve Geliştirme Dergisi*, 9(2), 65–75. doi: 10.29137/umagd.351746.
- Said, Zafar, L. Syam Sundar, Hegazy Rezk, Ahmed M. Nassef, Hafiz Muhammad Ali, and Mohsen Sheikholeslami. (2020). “Optimizing Density, Dynamic Viscosity, Thermal Conductivity and Specific Heat of a Hybrid Nanofluid Obtained Experimentally via ANFIS-Based Model and Modern Optimization.” *Journal of Molecular Liquids*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114287>.
- Şimşek, İjlal. (2019). “Mekanik Alaşım Yöntemi İle Üretilen Farklı Miktarlarda ZrO₂ Takviyeli Al-2Gr Matrisli Kompozit Malzemelerin Aşınma Performanslarının İncelenmesi.” *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6(3), 594–605. doi: 10.31202/ecjse.560741.
- Uludağ, Muhammet. (2018). “Investigation of the Relationship Between Casting Quality, Microstructure and Mechanical Properties in Al-18Si Alloy.” *Uluslararası Mühendislik Arastırma ve Geliştirme Dergisi*, 10(1), 30–41. doi: 10.29137/umagd.419659.
- Yılmaz, Necip Fazıl, Halil İbrahim Kurt, Murat Oduncuoğlu, and Engin Ergül. (2019). “Experimental and Theoretical Analysis of the Welding Process Parameters for UTS with Different Methods.” *Materials Research Express*, 6(1). doi: 10.1088/2053-1591/ae348.
- Zhao, Zhanyong, Peikang Bai, Wenbo Du, Bin Liu, Duo Pan, Rajib Das, Chuntai Liu, and Zhanhu Guo. (2020). “An Overview of Graphene and Its Derivatives Reinforced Metal Matrix Composites: Preparation, Properties and Applications.” *Carbon*, 170, 302–26. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.08.040>.



Hedef Programlama ile Toplu Ulaşım Araç Çizelgeleme Probleminin Çözümü: Kırıkkale Kampüs Hattı Örneği

The Solution of Vehicle Scheduling Problem in Public Transport with Goal Programming: Kırıkkale Campus Line Case

Hacı Mehmet Alakaş¹ , Emre Yazıcı¹ 

¹ Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 71542, Yahşihan, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 23/11/2020

Kabul / Accepted: 16/02/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 16/02/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Şehirlerde meydana gelen hızlı nüfus artışı ve kentleşme birçok problemi beraberinde getirmiştir. Bu problemlerin başında ulaşım problemi gelmektedir. Bununla birlikte bireysel araç kullanımının artması, trafikte beklemelerin ve gecikmelerin artması gibi birçok problemlere yol açmıştır. Bu problemlerin çözümünde birçok öneri bulunmakla birlikte toplu taşıma araçlarının kullanımı da bu önerilerden birisidir. Bu bağlamda toplu taşıma araçlarının kullanımını özendirici faaliyetler ve planlamalar yapılmaktadır. Toplu taşımada en çok kullanılan araçlar karayolu araçlarıdır. Bu araçların, hatların ve şoförlerin çizelgenmesi ulaşım probleminin çözümünde önemli hususlardandır. Bu çalışmada karayolu toplu taşıma araçlarına yönelik olarak ele alınmıştır. Çalışmada Kırıkkale ilinde faaliyet gösteren kampüs hattı araçlarının çizelgeleme problemi incelenmiştir. Problemin çözümünde hedef programlama ile bir matematiksel model önerisinde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler

“Ulaşım planlama, araç çizelgeleme, hedef programlama”

Abstract

Rapid population growth and urbanization in cities have brought many problems. The transportation problem comes first among these problems. However, the increase in individual vehicle use has led to many problems such as increased traffic waiting and delays. Although there are many suggestions to solve these problems, the use of public transport is one of these suggestions. In this context, activities and plans are made to encourage the use of public vehicles. Road vehicles are the most used vehicles in public transportation. Scheduling of these vehicles, lines, and drives is one of the important issues in solving the transportation problem. In this context, in the study, the road was considered for public vehicles. In the study, the scheduling problem of the campus line vehicles operating in Kırıkkale province was examined. In solving the problem, a mathematical model is proposed with goal programming.

Key Words

“Transportation planning, vehicle scheduling, goal programming”

1. Giriş

Günümüzde sağlık, güvenlik ve eğitim gibi birçok faaliyet kesintiye uğramayacak şekilde planlaması ve sürdürülmesi gereken faaliyetlerdir. Kesintiye uğramaması gereken faaliyetlerden birisi de ulaşım faaliyetidir. Dünyanın birçok yerinde nüfusun hızlı artışı, kırsal bölgelerden kentlere göçün artışı nedeniyle kentlerde yapılaşmanın artması ulaşımında problemleri beraberinde getirmiştir. Bununla birlikte bireysel araç kullanımının artması ulaşımında yaşanan problemleri daha karmaşık bir boyuta taşımıştır. Ortaya çıkan problemler ulaşımında toplu taşıma araçlarının kullanımını ve ulaşım planlama faaliyetlerinin önemini artırmıştır.

Dünyada ulaşım planlama faaliyetleri ilk olarak şehir içi ulaşım planları ile 1950'li yıllarda yapılmıştır. Bu yıllarda ABD'de hazırlanan ulaşım planları trafikte darboğaz oluşturan bölgelerdeki problemi çözmeye odaklanmıştır. 1950'li yıllardan bu yana ulaşım planlama süreci çağın getirdiği değişimlere ayak uydurarak çeşitli amaçlara göre düzenlenmiştir. 1950 ve 1960'lı yıllarda yapılan kentsel ulaşım planlaması "klasik model" olarak tanımlanmakta ve bu süreç nazım planı geliştirmek için geleceğe yönelik olarak rasyonel kararların alındığı bir süreç olarak tanımlanmaktadır. Ülkemizde ise şehir içi ulaşım planlama faaliyetleri ilk olarak 1960'lı yılların sonu 1970'li yılların öncesinde başlamıştır. 1970 ve 1985 yılları arasında İstanbul, Ankara ve İzmir gibi büyükşehirlerde ulaşım planlama faaliyetleri yapılmıştır. Bu dönemde toplu ulaşım için raylı sistemlere ve diğer ulaşım alternatiflerine yönelik fizibilite çalışmaları ve ulaşım etütleri yapılmıştır. 1985'li yıllardan sonra ise üç büyükşehir dışında Bursa, Eskişehir, Adana, Konya ve Antalya gibi birçok şehir için ulaşım yönelik etüt ve planlar geliştirilmiştir (Özalp & Öcalır, 2008). Şehir içi toplu ulaşım planlamada karayolu, demiryolu ve denizyolu gibi ulaşım alternatifleri ile birlikte yolcu sayısı, şehir trafiği, araç sayısı ve ulaşım ağı gibi unsurlar dikkate alınmıştır. Bu nedenle ulaşım faaliyetinde ortaya çıkan problemin yapısı oldukça karmaşık ve kapsamlı bir hal almaktadır. Ayrıca birçok şehirde alternatifler arasında demiryolu ve denizyolu yer almamaktadır. Bu nedenle de bu şehirlerde planlama faaliyetleri toplu ulaşımında en büyük paya sahip olan karayolu taşıma sistemleri dikkate alınarak yapılmaktadır.

Karayolu taşıma sistemlerinde, otobüs, minibüs ve midibüs tipi araçlar kullanılmaktadır. Bu araçların şehir içi ulaşımında durak sayıları oldukça fazla ve hareket saatlerinin zaman aralığı oldukça kısadır. Aynı zamanda hatta faaliyet gösteren araçların az sayıda olması halinde hat çizelgeleme problemleri çok sık yaşanır bir problem haline gelmektedir. Bu nedenle ulaşımında çizelgeleme yapılırken bir sistematik oluşturulmalıdır. Bu doğrultuda literatürde çizelgeleme probleminin çözümü için optimal ve sezgisel yöntemler kullanılmaktadır. Ulaşım planlamada hatların çizelgeleme, hareket zaman çizelgeleme, araç çizelgeleme ve şoför çizelgeleme gibi problemler karşımıza çıkmaktadır. Ulaşımında yaşanan problemlere yönelik çözüm önerilerinden birisi araçların çizelgelemesidir (Gündoğar & Akıl, 1998). Toplu taşıma sistemlerinde araçların, hatların ve şoförlerin görev çizelgelerini yapmak sistemin verimli çalışmasını sağlamak ve tüm paydaşları memnun etmek oldukça zordur. Özellikle araçların birden fazla güzergahta çalışmasının söz konusu olduğu durumlarda dengeli bir çalışma düzeni sağlamak çizelgelemeyi daha da zorlaştırmaktadır. Sürdürebilir bir çalışma düzeni sağlanamaz ise hem yolcuların hem de hizmet verenlerin memnuniyetsizliği ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda bu çalışmada Kırıkkale üniversitesi kampüs hattında hizmet veren ve farklı güzergahlarda görev alabilen araçların çizelgeleme problemi ele alınmıştır.

Çalışmanın birinci bölümünde ulaşım planlama ve çizelgeleme problemleri ile ilgili bilgiler sunulmasının ardından ikinci bölümde literatürde toplu ulaşım sistemlerinin çizelgelemesine yönelik literatür çalışmalarına yer verilmektedir. Çalışmanın üçüncü bölümünde çalışmada kullanılan yöntem hakkında bilgiler yer almaktadır. Dördüncü bölümde uygulamaya yönelik olarak problemin tanımı ve problemin çözümüne ilişkin önerilen matematiksel model ve sonuçlar yer almaktadır. Son bölümde ise sonuçlar yorumlanmaktadır.

2. Araç Çizelgeleme Problemi Literatür İncelemesi

Birçok ulaşım firması araçların çizelgelemesini el ile yapmaktadır. Bu şekilde bir çizelgeleme yapmak oldukça zaman alıcıdır ve çizelgelemenin başarısı mühendislerin tecrübesine bağlıdır. Ancak son zamanlarda otobüs hatlarının araç çizelgelemesi otomatik olarak geliştirilmiştir. Bu bağlamda kullanılan yöntemler kesin yöntemler ve sezgisel yöntemler olarak iki gruba ayrılmaktadır. Kesin yöntemler problemin çözümünde optimal sonuçlar bulan yöntemlerdir. Ancak bu tarz problemlerin bazı çeşitleri "NP hard" problem tipi olarak nitelendirildiği için hesaplama zamanları genellikle kabul edilemez düzeydedir (Zuo vd., 2015). Bu nedenle literatürde yer alan çalışmaların bir kısmı kesin yöntemler ile bir kısım çalışma ise sezgisel yöntemler tercih ederek probleme çözüm önerisi sunmaktadır.

Ulaşım faaliyetlerinin planlanmasına yönelik ulaşımında şoför, araç ve hat çizelgeleme problemlerinin incelendiği çalışmalar yer almaktadır. Çalışmaların bir kısmı tek bir amaca yönelik olarak yapılmıştır. Şoför çizelgeleme problemine yönelik olarak Lourenço vd. (2001), toplu ulaşımında şoför çizelgeleme problemini tabu arama ve genetik algoritma yöntemleri ile Goel (2009), şoför çizelgeleme problemini büyük şehir arama algoritması ile çözmüştür. Problemin çözümünde Avrupa Birliği tarafından önerilen düzenlemeleri dikkate almıştır. Perumal vd. (2020), şoför çizelgeleme problemi için sütun oluşturma sezgisel yöntemini kullanmıştır. Şoför çizelgeleme çalışmalarında genel olarak sezgisel yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir. Araç çizelgeleme problemlerini ele alan çalışmalarda problemin dinamik yapısını dikkate alan çalışmalar mevcuttur. Huisman, Freling ve Wagelmans (2004), problemin yapısını statik ve dinamik olarak ikiye ayırmış ve dinamik araç çizelgeleme problemi için matematiksel model önerisinde bulunmuştur. Naumann vd. (2011), benzer bir problem için stokastik matematiksel optimizasyon modeli önermiştir. He, Yang, ve Li (2018), Pekin'de bir otobüs hattına yönelik olarak stokastik seyahat süreleri altında araç çizelgeleme problemini dinamik programlama modeli

ile çözmüştür. Shui vd., (2015), kolonal seçim algoritması ile şehir içi otobüs hatlarında araç çizelgeleme probleminin çözümü için, Guedes vd.(2016) ise çok depolu araç çizelgeleme problemi için sezgisel bir yöntem önermiştir. Bazı çalışmalarda ulaşımda hedef yolcu grubu belirlenerek çizelgeleme problemi incelenmiştir. Fügenschuh (2009), öğrencileri dikkate alarak toplu ulaşımda araçların çizelgeleme problemi için tam sayılı programlama modeli geliştirmiştir. Kim vd. (2012), ise okul otobüslerinin çizelgeleme problemini dal ve sınır yöntemi ve sezgisel bir yöntem ile çözmüştür.

Bazı çalışmalar ise araç-şoför çizelgeleme, şoför-hat çizelgeleme ve şoför-hat-zaman çizelgeleme gibi birden fazla amaç için probleme çözüm önerisi sunmuştur. Mesquita, Paisas ve Respício (2009), ise şoför çizelgeleme problemini genişleterek probleme araçları da dahil etmiştir. Şoför ve araç çizelgeleme probleminin çözümünde doğrusal programlama ve sezgisel yöntemleri bir arada kullanarak problemin çözümü için üç farklı model önerisinde bulunmuştur. Liu vd. (2017), araçların duraklardan hareket zamanları ile duraklara varışlarının eş zamanlı olmasını sağlamak için ulaşımda zaman ve araç çizelgeleme problemi tam sayılı programlama modeli ile çözülmüştür. Fonseca vd. (2018), zaman çizelgeleme ve araç çizelgeleme probleminin entegre bir şekilde çözümü problemin entegrasyonunda karma tam sayılı bir model geliştirilmiştir ve problemin çözümü için meta sezgisel bir yöntem önermiştir. Kiran ve Gündüz (2012), problemin boyutunu daha da genişleterek ulaşım faaliyetinde hizmet veren bir hat üzerinde belirli güzergâhların gidiş dönüş seferlerine yönelik olarak şoför-hat-zaman çizelgeleme problemini arı kolonisi optimizasyonu ile incelemiştir. Schöbel (2017), ise hat planlama, zaman çizelgeleme ve araç çizelgeleme problemlerini entegre ederek problemi çok amaçlı bir şekilde ele almıştır. Zhoa vd. (2020), şoförlerin dinlenme süresi kısıtı altında araç ve şoför sayılarını minimize etmek için tabu arama ve dinamik programlama algoritmalarını entegre ederek problemi çözmüştür. Yapılan çalışmalarda farklı amaçlar doğrultusunda sezgisel ve optimal çözüm yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir.

Özellikle son yıllarda yeşil ulaşım ile birlikte ulaşımda farklı alternatif araçların kullanılmasına ilişkin çalışmalar yapılmaktadır. Literatürde farklı araç tiplerini dikkate alan çalışmaların olduğu görülmektedir. Hassold ve Ceder (2014), araç çizelgeleme problemini farklı araç tiplerini dikkate alarak incelemiştir. Kapasite açısından üç farklı araç grubuna yönelik olarak pareto yöntemi ile bir çizelgeleme önerisinde bulunmuştur. Wen vd., (2016), tarifeli otobüs yolcularında elektrikli araç çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Belli zamanlarda belli noktalardan harekete eden otobüslerin çizelgeleme probleminin çözümü için adaptif komşu arama sezgiseli ve karma tam sayılı programlama ile çözüm önerisi sunulmuştur. Entegre edilen bu üç problemin çözümü için yarı parametrik model geliştirmiştir. Ji, Bie, ve Shen (2020), şehir içi ulaşımda elektrikli otobüslerin çizelgeleme problemini incelemiştir. Elektrikli otobüslerin batarya durumlarını da dikkate alarak genetik algoritma ile otobüslerin çizelgeleme problemine çözüm önerisi sunmuştur. Yao vd. (2020), ise alternatif elektrikli araçlar arasında elektrik tüketimlerinin ulaşımda sağlayacağı tasarrufları dikkate alarak elektrikli araç çizelgeleme problemi için sezgisel bir algoritma önermiştir. Nagy ve Horváth (2020) ise toplu ulaşımda gelişen teknolojileri dikkate alarak otonom araçların çizelgeleme sistemine etkilerini ve ekonomik katkılarını inceleyen çalışmasını literatüre kazandırmıştır.

Karayolu dışında havayolu ve demiryolu ulaşım sistemlerinde çizelgeleme problemlerini inceleyen çalışmalarda literatürde yer almaktadır. Orhan vd. (2010), havayolu ulaşım sistemlerinde uçuşların planlanması ve çizelgenmesini incelemiştir. Orhan vd. (2012), bir diğer çalışmalarında uçak rotalama ve bakım çizelgeleme problemi için hedef programlama ile bir model önerisinde bulunmuştur. Demiryolunda ise Gültekin ve Eren (2014), tren hareket saatlerindeki gecikmeleri minimize etmek için 16 istasyonlu 6 trenin çalıştığı bir hat için 0-1 tam sayılı programlama modeli ile probleme çözüm önerisi sunulmuştur. Gencer ve Eren (2016), demiryollarında yolculara ilişkin talep tahmini yaparak metro hatlarında zaman çizelgeleme problemini incelemiştir. Erpik (2019), İstanbul'da metrobüs hatlarının yoğun saatlerinde yolcuların bekleme sürelerini ve araç sayısını minimize etmek için hat çizelgeleme problemi için genetik algoritma sezgiseli ile bir çözüm sunmuştur.

Literatürde araç çizelgeleme, otobüs çizelgeleme, zaman çizelgeleme ve toplu ulaşım planlamaya yönelik olarak yapılan araştırmalar neticesinde çalışmamızın kapsamında değerlendirilebilecek çalışmalar incelenmiştir. Bu kapsamda ele alınan birçok çalışma vardır. Çalışmaları problemin çözüm yöntemine ve tipine göre sınıflanabilir. Bu çalışma kapsamında incelenen çalışmalar Tablo 1'de özetlenmektedir. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde hedef programlama yönteminin bu alanda kullanımının sınırlı olduğu görülmektedir. Hedef programlama yönteminde hedeflerin bir kısıt halinde modele dahil edilerek birden fazla amacı optimize etme avantajı dikkate alınarak hedef programlama yöntemi kullanılmıştır. Literatürde kullanılan yöntemlerden farklı olarak hedef programlama modeli önererek literatüre katkı sağlaması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada ise bir aracın birden fazla güzergahta çalışması gerektiği durumda çalışma düzeninin belirlenmesine yönelik bir problem incelenmiştir. Literatürde yer alan benzer çalışmalarda genel olarak araçların çalıştıkları güzergahlar veya hatlar sabittir. Araçlar gün içerisinde aynı güzergahlarda farklı zaman dilimlerinde hizmet vermektedir. Bu çalışmada ele alınan problemde araçların her gün farklı güzergahlarda çalışması söz konusudur. Güzergahların farklı olması halinde belli bir dönemde içerisinde her güzergahta çalışacak araç sayısı ve her aracın güzergahlar çalışacağı gün sayısı farklılık göstermektedir. Bu bağlamda araçların farklı güzergahlarda çalışması nedeniyle her aracın her güzergahta eşit düzeyde çalışması bir hedef olarak belirlenmiştir. Çalışmada hedef programlama yöntemi ile bir model önerisi sunulmuştur.

Tablo 1. Literatür İncelemesi

Yazar (Yıl)	Yöntemler			Ulaşım Sistemi		Çizelgeleme Problemi		
	OY	SY	Diğer	Karayolu	Demiryolu	Araç	Şoför	Diğer
Lourenço vd., (2001)		✓		✓			✓	
Huisman vd. (2004)	✓			✓		✓		
Fügenschuh (2009)	✓			✓		✓		
Goel, (2009)		✓		✓		✓		
Mesquita vd. (2009)	✓	✓				✓	✓	
Orhan vd. (2010)			✓			✓	✓	
Naumann vd., (2011)	✓			✓		✓		
Orhan vd. (2012)	✓					✓		
Kim, Kim, & Park (2012)	✓	✓		✓		✓		
Kıran ve Gündüz (2012)		✓		✓			✓	
Gültekin ve Eren (2014)	✓				✓	✓		
Hassold & Ceder (2014)			✓	✓		✓		
Shui vd., (2015)		✓		✓		✓		
Gencer ve Eren (2016)			✓		✓			✓
Guedes vd., (2016)		✓		✓		✓		
Wen vd., (2016)	✓	✓		✓		✓		
Liu vd., (2017)	✓			✓		✓		✓
Schöbel, (2017)		✓		✓		✓	✓	✓
Fonseca vd., (2018)	✓	✓		✓		✓		✓
He vd. (2018)	✓			✓		✓		
Erpik (2019)	✓			✓		✓		
Ji vd. (2020)		✓		✓		✓		
Nagy ve Horváth (2020)			✓	✓				✓
Perumal vd. (2020)		✓		✓			✓	
Yao vd. (2020)		✓		✓		✓		
Zhao vd.(2020)	✓	✓		✓		✓	✓	

Kısaltmalar: OY: Optimal Yöntemler, SY: Sezgisel Yöntemler

3. Hedef Programlama

Hedef programlama karar verme problemlerinin çözümünde kullanılan ve bütün özellikleri belirli olan hedeflere yönelik karar vericinin hedeflerine ulaşılmasında hedeften sapmaları minimize etmek için kullanılan analitik bir yöntemdir. Hedef programlama yöntemi optimize edilmek istenen birden fazla ve birbiriyle çelişen hedeflerin amaç fonksiyona dahil edilerek esnek bir modelleme imkanı sunmaktadır (Türkoğlu, 2017). Sapma değişkenleri pozitif sapma ve negatif sapma olarak iki ayrı biçimde ifade edilir (Özder & Eren, 2016). Aynı zamanda hedef programlama aynı birim ile ölçülemeyen değişkenlerin amaç fonksiyonunda yer almasına imkan tanımaktadır. Hedef programlama ulaşım (Hamurcu & Eren, 2018), sağlık (Uslu vd., 2018; Varlı & Eren, 2017), güvenlik (Ünal & Eren, 2016), personel atama (Varlı vd., 2017), vardiya çizelgeleme (Kaçmaz vd., 2019; Özcan vd., 2017), ve tedarikçi seçimi (Özder & Eren, 2016) gibi konularda sıkça kullanılmaktadır.

Hedef programlama yöntemi çok kriterli karar verme yöntemlerindedir (Özcan & Toklu, 2009). Hedef programlama işgücü planlama, ulaşım ve lojistik, çizelgeleme ve üretim faaliyetlerinin planlanması, kaynak planlama ve finansal analiz gibi birçok uygulama alanına sahiptir. Hedef programlama amaçların ve hedeflerin eş zamanlı olarak gerçekleşmesini sağlar. Yöntem tüm kısıtları sağlamayı ama hedeflere olabildiğince ulaşmayı amaçlamaktadır (Kaçmaz vd., 2020). Hedef programlamanın değişkenleri ve genel gösterimi aşağıdaki gibidir (Özder & Eren, 2016).

Değişkenler:

x_j : j . karar değişkeni

a_{ij} : i . hedefin j . karar değişkeni katsayısı

s_{ij} : Karar değişkenlerinin kısıt katsayıları

b_i : i . hedef için ulaşılmak istenen değer

c_i : Kısıtların sağ taraf değeri

d_i^+ : i . hedefin pozitif sapma değişkeni

d_i^- : i . hedefin negatif sapma değişkeni

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^m (d_i^+ + d_i^-) \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + (d_i^+ + d_i^-) = b_i \quad i = 1 \dots m, \quad j = 1 \dots n \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n s_{ij} x_j \leq c_i \quad i = 1 \dots m, \quad j = 1 \dots n \quad (3)$$

$$d_i^+ * d_i^- = 0 \quad (4)$$

$$x_j, d_i^+, d_i^- \geq 0 \quad i = 1 \dots m, \quad j = 1 \dots n \quad (5)$$

4. Uygulama

Bu çalışmada Kırıkkale Üniversitesi kampüs hattında şehir içi yolcu taşımacılığı faaliyetini sunan kampüs hattı araçlarının çizelgelemesi amaçlanmaktadır. Kırıkkale ilinde kampüs hattının yolcu sayısı şehir içindeki toplam yolcu sayısı içerisinde yüksek bir paya sahiptir. Hattın kullanıcıları arasında üniversite öğrencileri yoğunlukta olmakla birlikte hat güzergahında tıp fakültesi hastanesinin yer alması hattaki yolcu sayısını daha da artırmaktadır. Bu durum problemin bu hat üzerinden ele alınmasının başlıca kaynağıdır. Kampüs hattındaki araçların çalışma düzenine ilişkin olarak yaşanan problemler incelenmiştir. Bu kapsamda kampüs hattında toplu taşıma faaliyetini planlayan ilgili taşımacılık birimlerinden hattın çalışma düzenine ilişkin veriler elde edilmiştir. Hatta faaliyet gösteren araç sayısı, araçların çalışacakları güzergahlar, çalışma düzeni ve güzergâh sayısı çizelgeleme probleminin temel girdilerini ifade etmektedir.

4.1. Kabul ve Varsayımlar

Kampüs hattında toplamda 72 adet minibüs tipi araç hizmet vermektedir. Araçların toplamda 5 farklı güzergâh üzerinde çalışması mümkündür. Bu güzergahlar sağlık güzergahı, ring güzergahı gündüz, ring güzergahı akşam, şehir güzergahı gündüz ve şehir güzergahı akşam olarak isimlendirilmektedir. Her güzergahta çalışacak araç sayısı sabittir. Sağlık güzergahında 18, ring güzergahında gündüz 14, ring güzergahında akşam 4, şehir güzergahında gündüz 26 ve şehir güzergahında akşam 10 araç çalışmaktadır. Bu bilgiler Tablo 2’de özetlenmektedir. Modelde araçların çalışma gün sayısı tanımlanırken hafta sonları dahil edilmemiştir. Hafta sonu araçların çalışma düzenleri, ilk 36 araç bir hafta sonu, ikinci 36 araç ikinci hafta sonu çalışacak şekilde sabit olarak planlandığı için modelde araçların çalışma gün sayısı 20 gün olarak tanımlanmıştır. 5 farklı güzergahından ikisi akşamları çalışan araçları ifade etmektedir. Akşamları çalışan araçların bir sonraki günlerde akşam çalışmaması istenmektedir. Ayrıca her i. aracının k. güzergahta çalışacağı gün sayısı çalışmanın hedef kısıtlarını ifade etmektedir. Hedef değerler Eşitlik 6 ile hesaplanmıştır.

Tablo 2. Güzergâh Bilgileri

Güzergah İndisi (k)	Güzergah Adı	Güzergahlarda Çalışacak Araç Sayısı
1	Sağlık güzergahı	18
2	Ring güzergahı (Gündüz)	14
3	Ring güzergahı (Akşam)	4
4	Şehir güzergahı (Gündüz)	26
5	Şehir güzergahı (Akşam)	10

n= Toplam araç sayısı

m= Çalışılacak gün sayısı

a= k. güzergahta ihtiyaç duyulan en az araç sayısı

V_k= Bir aracın k. güzergahta çalışacağı gün sayısı

Eşitlik 6 ile elde edilen sonuç en yakın tam sayıya yuvarlanarak her aracın her güzergahta en az çalışacağı gün sayısı elde edilmiştir. Eşitlik 6’ya göre hesaplanan hedef kısıtları Tablo 3’te özetlenmektedir.

$$V_k = [(n/m)*a] \quad (6)$$

Tablo 3. Hedef Kısıtlarının Hesaplanması

Hedef	Açıklama	Hedef Değeri
V ₁	Her aracın sağlık güzergahında çalışması hedeflenen gün sayısı	5
V ₂	Her aracın ring güzergahında gündüz çalışması hedeflenen gün sayısı	4
V ₃	Her aracın ring güzergahı akşam çalışması hedeflenen gün sayısı	1
V ₄	Her aracın şehir güzergahında gündüz çalışması hedeflenen gün sayısı	7
V ₅	Her aracın şehir güzergahında akşam çalışması hedeflenen gün sayısı	3

Bu veriler ışığında hattı optimize edecek araç çizelgeleme probleminin çözümü için hedef programlama yöntemi ile bir matematiksel model geliştirilmiştir.

Parametreler:

n = Hatta çalışan araç sayısı	$n=72$	(7)
m =Hattın hizmet verdiği gün sayısı	$m=20$	(8)
t = Araçların çalıştığı güzergah sayısı	$t=5$	(9)
i : Araç indisi	$i=1,2,\dots,n$	(10)
j : Gün indisi	$j=1,2,\dots,m$	(11)
k : Güzergah indisi	$k=1,2,\dots,t$	(12)
h_k = k güzergahında ihtiyaç duyulan araç sayısı		(13)

Karar Değişkenleri:

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1; & i. nci \text{ araç } j. nci \text{ günde } k. nci \text{ güzergaha atanırsa} \\ 0; & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} d_1^+ &= \text{Sağlık güzergahında her aracın çalışacağı gün sayısından pozitif yönde sapma} & (15) \\ d_1^- &= \text{Sağlık güzergahında her aracın çalışacağı gün sayısından negatif yönde sapma} & (16) \\ d_2^+ &= \text{Ring güzergahında gündüz her aracın çalışacağı gün sayısından pozitif yönde sapma} & (17) \\ d_2^- &= \text{Ring güzergahında gündüz her aracın çalışacağı gün sayısından negatif yönde sapma} & (18) \\ d_3^+ &= \text{Ring güzergahında akşam her aracın çalışacağı gün sayısından pozitif yönde sapma} & (19) \\ d_3^- &= \text{Ring güzergahında akşam her aracın çalışacağı gün sayısından negatif yönde sapma} & (20) \\ d_4^+ &= \text{Şehir güzergahında gündüz her aracın çalışacağı gün sayısından pozitif yönde sapma} & (21) \\ d_4^- &= \text{Şehir güzergahında gündüz her aracın çalışacağı gün sayısından negatif yönde sapma} & (22) \\ d_5^+ &= \text{Şehir güzergahında akşam her aracın çalışacağı gün sayısından pozitif yönde sapma} & (23) \\ d_5^- &= \text{Şehir güzergahında akşam her aracın çalışacağı gün sayısından negatif yönde sapma} & (24) \end{aligned}$$

Amaç fonksiyonu:

$$\text{Min}_Z = \sum_{i=1}^n d_1^+ + d_1^- + d_2^+ + d_2^- + d_3^+ + d_3^- + d_4^+ + d_4^- + d_5^+ + d_5^- \quad (25)$$

Kısıtlar:

İlk olarak güzergahlar çalışacak araç sayıları ile ilgili kısıtlar ifade edilmektedir. Kampüs hattında faaliyet gösteren araçların toplam sayısı 72'dir. 5 farklı güzergah mevcuttur. Her güzergahta ihtiyaç duyulan en az araç sayısı bellidir.

1. Kısıt: güzergahlarda sırasıyla 18,14,4,26 ve 10 adet araç çalışmalıdır.

$$\sum_{i=1}^{72} x_{ijk} = h_k \quad j=1,2,3,\dots,m \quad (26)$$

2. Kısıt: i aracı j . günde 3. veya 5.güzergahta çalışıyor ise $j+1$ ve $j+2$. günde bu güzergahlarda çalışmamalıdır.

$$X_{ij3} + X_{i(j+1)3} + X_{i(j+2)3} \leq 1 \quad i=1,2,3,\dots,n, \quad j=1,2,\dots,(m-2) \quad (27)$$

$$X_{ij5} + X_{i(j+1)5} + X_{i(j+2)5} \leq 1 \quad i=1,2,3,\dots,n, \quad j=1,2,\dots,(m-2) \quad (28)$$

3. Kısıt: i aracı j . günde 3. ve 5. güzergah üst üste iki gün çalışmamalıdır.

$$X_{ij3} + X_{i(j+1)3} + X_{ij5} + X_{i(j+1)5} \leq 1 \quad i=1,2,3,\dots,n, \quad j=1,2,\dots,(m-1) \quad (29)$$

4. Kısıt: Hedef kısıtları,

Hedef kısıtı 1: i . araç 1. güzergahta 5 gün çalışmalıdır.

$$\sum_{j=1}^{20} x_{ij1} + d_{i1}^- - d_{i1}^+ = V_1 \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (30)$$

Hedef kısıtı 2: i . araç 2. güzergahta 4 gün çalışmalıdır.

$$\sum_{j=1}^{20} x_{ij2} + d_{i2}^- - d_{i2}^+ = V_2 \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (31)$$

Hedef kısıtı 3: *i*. araç 3. güzergahta 1 gün çalışmalıdır.

$$\sum_{j=1}^{20} x_{ij3} + d_{i3}^- - d_{i3}^+ = V_3 \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (32)$$

Hedef kısıtı 4: *i*. araç 4. güzergahta 7 gün çalışmalıdır.

$$\sum_{j=1}^{20} x_{ij4} + d_{i4}^- - d_{i4}^+ = V_4 \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (33)$$

Hedef kısıtı 5: *i*. araç 5. güzergah 3 gün çalışmalıdır.

$$\sum_{j=1}^{20} x_{ij5} + d_{i5}^- - d_{i5}^+ = V_5 \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (34)$$

4.2. Hedef Programlama Modeli Çözüm Sonuçları

Modelin çözümünde Intel (R) Core (TM) i7 5500u CPU @ 2.40 GHz işlemcisi 16 GB belleği ve Windows 10 işletim sistemine sahip bilgisayar kullanılmıştır. Elde edilen veriler ile IBM ILOG CPLEX Optimization Studio programı aracılığıyla matematiksel model yazılmıştır. CPLEX çözücüsü 3,04 saniyede elde edilen sonuçlar Şekil 1'de yer almaktadır. Şekil 1'de her aracın hangi gün hangi güzergaha atandığı yer almaktadır.

Hedef programlama modelinin çözümü neticesinde Şekil 1'de hangi aracın hangi güzergahta hangi gün çalışacağı sonuçları elde edilmiştir. Şekil 1'de 72x20 boyutunda bir matris ile elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Satırda araçlar sütunda ise günler yer almaktadır. Matrisin elamanları ile *i*. aracın *j*. günde hangi güzergahta çalıştığı verilmiştir. 1. araç için Şekil 1'i inceleyecek olursak; 1. aracın 1,2,5,13 ve 20. günlerde 1. güzergahta çalışacağı, 6,9,12 ve 18. günlerde 2 güzergahta, 17. günde 3. güzergahta, 3,8,10,14,15,16 ve 19. Günlerde 4. güzergahta ve 4,7 ve 11 günlerde ise 5. güzergahta çalışacağı görülmektedir. Şekil 1'de bütün araçların bu şekilde çalışma düzeni sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre d_1^+ , d_1^- , d_2^+ , d_3^- , ve d_5^+ , hedef değişkenlerinden herhangi sapma olmadan çözüm elde edilmiştir.

Bazı değişkenlerden ise sapmalar ortaya çıkmıştır. d_2^- hedef değişkeninden sapma 8 birim, d_3^+ , hedef değişkeninden sapma 8 birim, d_4^+ hedef değişkeninden 16 birim sapma, d_4^- hedef değişkeninden 16 birim ve d_5^- hedef değişkeninden ise 16 birim sapma olmuştur. Bu sapmalar araç başına oranlandığında d_2^- hedef değişkeninden araç başına 0,11, d_3^+ , hedef değişkeninden araç başına 0,11, d_4^+ hedef değişkeninden araç başına 0,22 ve d_5^- hedef değişkeninden ise araç başına 0,22 birimlik bir sapma söz konusudur. Araçların güzergahlarda çalışacağı gün hedefleri hesaplanırken ring güzergahı gündüz, ring güzergahı akşam, şehir güzergahı gündüz ve şehir güzergahı akşam için hedef değerleri tam sayı çıkmamıştır. Bu nedenle hedef değerlerden sapmalar olması beklenen bir durumdur. Hedeflerden sapmaların hedef değişkenlerin hesaplanması kullanılan formül neticesinde elde edilen değer en yakın tamsayıya yuvarlanması nedeniyle ortaya çıktığı öngörülmektedir. Ancak görüldüğü gibi mevcut sapmalar araç başına hesaplandığında çok küçük düzeyde sapmalardır.

Kurulan model ile toplu taşıma araçlarının birden fazla hat güzergahında faaliyet göstermesi söz konusu olduğu durumlar için örnek teşkil edecek bir sonuç elde edilmiştir.

Araçlar	Günler																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1	1	4	5	1	2	5	4	2	4	5	2	1	4	4	4	3	2	4	1
2	4	5	1	1	2	3	1	4	2	5	4	2	4	4	1	4	2	4	5	1
3	4	2	4	4	2	1	5	1	4	1	3	4	2	1	5	1	5	4	4	2
4	2	5	2	4	5	1	1	5	2	1	3	4	4	4	1	4	2	4	1	4
5	1	4	4	4	3	2	4	2	1	1	5	4	5	2	1	1	2	4	5	4
6	1	5	1	4	3	2	1	4	2	1	2	5	4	4	1	2	4	4	5	4
7	4	4	1	4	1	2	3	4	5	1	2	5	4	1	5	2	1	4	4	2
8	2	1	4	4	4	2	2	4	1	1	2	5	4	5	4	1	3	4	5	1
9	4	4	3	4	2	1	5	2	4	1	4	2	5	4	1	2	5	1	4	1
10	1	4	4	1	4	4	4	5	2	5	2	5	4	4	1	1	2	2	3	1
11	4	4	5	4	1	1	2	4	1	1	5	4	2	4	2	5	1	4	3	2
12	4	4	1	4	2	1	4	5	2	1	4	5	4	4	3	2	1	5	2	1
13	1	4	1	4	1	3	2	4	5	2	5	4	4	4	4	1	5	2	1	2
14	2	4	2	5	1	1	4	4	1	3	4	4	4	5	4	5	1	2	2	1
15	1	4	4	4	3	2	5	2	1	4	1	5	4	4	4	2	1	2	5	1
16	1	1	3	4	2	2	5	2	4	1	1	4	4	2	4	5	1	5	4	4
17	4	1	3	4	5	2	5	2	4	1	4	4	4	2	4	1	1	2	5	1
18	1	4	2	1	4	1	2	4	3	4	4	1	4	5	2	1	4	5	2	5
19	1	3	1	5	4	2	1	4	4	4	4	4	2	2	5	1	5	1	4	2
20	4	1	4	1	4	5	1	4	5	1	2	5	2	2	4	4	3	2	1	4
21	4	4	4	4	1	2	1	5	1	2	4	4	3	4	5	2	5	1	1	2
22	4	4	4	1	1	5	4	1	2	4	5	4	2	4	4	3	2	1	1	2
23	1	3	4	1	4	1	5	2	1	4	1	5	2	4	5	4	4	4	2	2
24	1	1	4	4	4	2	4	1	3	4	5	1	2	5	2	5	4	4	1	2
25	1	4	4	4	1	2	4	1	5	1	5	4	5	1	2	2	4	4	3	2
26	4	1	1	1	5	2	4	3	4	4	1	4	4	1	4	2	4	5	4	5
27	1	4	1	4	1	2	4	2	3	4	5	1	4	1	2	2	5	4	4	5
28	3	2	4	5	4	1	4	4	1	4	5	1	2	2	5	1	4	1	2	4
29	4	4	5	4	5	4	2	1	1	4	5	1	4	1	3	2	4	1	2	2
30	3	4	4	5	1	1	4	2	1	4	1	5	4	4	4	2	5	1	2	2
31	5	4	2	4	5	1	4	2	4	4	1	1	5	4	2	1	4	3	2	1
32	5	1	2	1	2	5	4	4	4	4	3	4	1	1	4	1	5	2	2	4
33	4	3	4	4	5	1	1	2	4	4	4	1	4	2	2	5	2	1	5	1
34	4	4	2	4	1	1	4	2	2	3	1	1	5	4	2	4	4	3	1	5
35	2	4	5	2	4	1	4	1	1	1	2	1	3	2	4	5	4	4	4	5
36	2	4	2	4	1	4	4	1	1	2	4	1	5	4	2	4	4	4	1	3
37	2	4	2	1	4	4	4	5	2	5	2	1	1	5	1	4	4	3	4	1
38	3	4	2	4	1	4	5	4	1	5	1	1	2	4	4	2	2	5	4	4
39	4	4	2	5	4	4	1	4	4	2	1	3	1	5	2	1	2	5	1	4
40	2	1	2	1	2	5	1	1	4	2	4	4	4	5	4	1	3	4	5	4
41	4	1	1	1	4	1	3	4	2	2	3	4	5	4	5	4	2	2	4	1
42	1	5	1	1	4	4	2	3	4	5	4	2	1	4	2	4	4	1	4	4
43	5	1	4	5	4	4	2	4	1	1	1	2	2	5	4	4	2	1	4	3
44	1	1	1	1	2	4	2	3	4	5	4	2	5	4	4	4	2	1	5	4
45	2	1	1	5	2	4	3	4	4	5	1	2	5	1	4	4	2	1	4	4
46	3	2	5	1	4	5	2	4	2	5	1	4	4	1	1	4	4	2	1	4
47	1	2	5	1	5	4	4	5	4	2	1	4	3	4	1	4	2	2	4	1
48	5	1	4	2	5	4	4	3	2	4	1	4	4	4	1	5	1	4	1	2
49	4	2	5	2	4	5	1	5	4	2	4	2	4	3	4	1	1	1	1	4
50	5	1	4	2	2	5	1	5	4	2	4	4	4	3	2	4	1	1	1	4
51	4	5	4	5	2	4	2	5	4	2	1	4	1	2	4	4	1	1	3	1
52	4	5	4	2	4	4	1	4	2	5	1	1	2	3	2	5	1	1	4	4
53	4	5	4	5	2	4	4	1	1	2	4	3	1	1	5	2	1	2	4	4
54	4	1	5	2	4	5	4	1	2	2	2	1	1	5	4	1	4	4	4	3
55	4	1	2	2	4	5	4	4	1	2	4	4	1	1	3	4	1	5	2	4
56	5	2	5	2	4	1	4	2	1	4	4	4	1	1	3	4	1	4	2	4
57	2	2	5	2	2	5	1	5	4	4	4	4	1	3	1	4	1	4	1	4
58	5	2	1	2	4	4	1	1	3	4	4	4	2	1	1	4	4	5	2	5
59	1	5	4	2	2	4	2	1	1	4	2	4	5	1	1	4	4	3	4	5
60	5	2	4	1	4	4	4	2	4	5	2	1	3	4	1	3	1	1	4	5
61	4	2	5	1	5	1	4	1	4	1	2	2	4	1	2	3	4	4	4	5
62	2	4	1	4	4	3	2	1	5	1	4	5	4	1	5	4	2	1	2	4
63	4	2	4	4	1	4	3	4	5	4	2	2	1	1	1	3	4	5	2	1
64	5	2	1	3	1	4	4	1	4	4	1	4	4	1	4	2	1	2	4	4
65	2	2	1	1	4	3	1	4	5	4	2	1	1	4	5	4	4	5	4	2
66	2	2	4	3	1	4	1	4	5	2	1	2	1	4	1	5	4	5	4	4
67	5	4	1	3	1	4	2	1	5	4	2	3	2	4	1	1	4	4	4	3
68	2	1	2	3	4	1	4	4	4	4	1	1	2	4	2	4	4	4	1	4
69	4	4	3	2	1	4	2	1	5	1	4	2	2	5	4	4	5	4	1	1
70	1	3	4	2	3	4	1	4	4	3	4	2	2	1	4	1	5	4	1	5
71	2	5	1	4	5	4	5	2	4	4	4	3	1	2	4	1	4	4	1	1
72	4	5	2	2	4	1	5	1	4	3	1	2	1	2	4	5	1	4	4	4

Şekil 1. Hedef Programlama Modeli Sonuçları

5. Sonuç

Dünyada ve ülkemizde toplu ulaşımın planlanması oldukça önemli bir faaliyettir. Birçok ülkede ulaşım alternatifleri arasında en çok kullanılan alternatif karayolu araçlarıdır. Son zamanlarda teknolojinin gelişmesi ile birlikte toplu ulaşımında raylı sistemler gibi birçok alternatif geliştirilmeye çalışılmaktadır. Ancak bu sistemlerin kurulması maliyetli ve coğrafi açıdan her bölgeye kurulması imkanı bulunmamaktadır. Bu kapsamda şehir içi ulaşımında yalnızca karayolu araçlarının kullanıldığı birçok şehir bulunmaktadır. Ülkemizde Kırıkkale ili toplu ulaşımında karayolu araçlarının kullanıldığı illere bir örnektir. Bu çalışmada Kırıkkale ili örneği dikkate alınmıştır. Kırıkkale kampüs hattı, gerek öğrenci sayısının fazla olması nedeniyle gerekse güzergahtaki duraklar nedeniyle ildeki toplu taşıma hatları içinde yolcu kapasitesi yüksek hattır.

Bu çalışmada Kırıkkale üniversitesi kampüs hattında hizmet veren araçların çizelgelenmesinde yaşanan problemler dikkate alınmıştır. Bu çalışmada araçların beş farklı güzergah üzerinde çalışma durumu olan bir problem ele alınmıştır. Kampüs hattında çalışan araçların çalışma düzenleri incelenerek bir hedef programlama modeli geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre belirlenen hedeflerden sapmalar minimum düzeydedir. Her güzergaha ihtiyaç duyulan kadar araç ataması sağlanmıştır. Güzergahlar arasında yolcu sayılarının farklılığı dikkate alınmıştır. Özellikle akşam saatlerinde yolcu sayıları azalmaktadır. Bu nedenle araçların şehir ve ring güzergahlarının akşam seferlerinde ardi ardına iki gün çalışmasını engelleyecek kısıtlar modele dahil edilmiştir. Böylelikle çalışma düzeninin daha dengeli olması sağlanmıştır. Hedef programlama modelinin çözümü neticesinde her bir aracın hangi gün hangi güzergahta çalışacağı tespit edilmiştir. Bu yönüyle çalışmanın sonuçları önem arz etmektedir. Benzer çalışma düzenine sahip veya bu ve benzeri bir çalışma düzeni oluşturulması planlanan hatlar için bu çalışmada oluşturulan hedef programlama modeli bir örnek teşkil etmektedir.

Bu alanda yapılacak sonraki çalışmalarda talep tahminlerinin yapılmasını ve talep tahminlerinin dikkate alınmasını öneririz. Yolcu sayılarının talep tahmini yöntemleri ile tahmini yapılarak güzergahlar arası yolcu sayılarında önemli farklılıkların ortaya çıkması halinde ilgili güzergahta çalışacak araç sayıları belirlenebilir. Talep tahminleri dikkate alınarak gelir seviyelerini eşitlemeye yönelik hedefler belirlenebilir. Ayrıca COVİD-19 sürecinde kapasitelerin oldukça önemli olduğunu görmekteyiz. Toplu taşıma araçlarında sosyal mesafeye uygun oturma düzeninin olması kapasiteleri oldukça etkilemektedir. Bu durumu dikkate alarak farklı kapasite boyutlarının dikkate alınması sonraki çalışmalar için önerimizdir.

Bu çalışmada yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. Çalışmada etik kurallara uyulmuştur.

Kaynakça

- Erpic, Z. (2019). *Hat Çizelgeleme Problemine Genetik Algoritma Yaklaşımı: İETT Örneği* [Marmara Üniversitesi]. <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>
- Fonseca, J. P., van der Hurk, E., Roberti, R., & Larsen, A. (2018). A matheuristic for transfer synchronization through integrated timetabling and vehicle scheduling. *Transportation Research Part B: Methodological*, 109, 128–149. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.01.012>
- Fügenschuh, A. (2009). Solving a school bus scheduling problem with integer programming. *European Journal of Operational Research*, 193(3), 867–884. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.10.055>
- Gencer, M. A., & Eren, T. (2016). Ankara Metrosu M1 (Kızılay-Batıkent) Hattı Hareket Saatlerinin Çizelgelenmesi. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 4(2), 25–36. <https://doi.org/10.21541/apjes.59527>
- Goel, A. (2009). Vehicle scheduling and routing with drivers' working hours. *Transportation Science*, 43(1), 17–26. <https://doi.org/10.1287/trsc.1070.0226>
- Guedes, P. C., Lopes, W. P., Rohde, L. R., & Borenstein, D. (2016). Simple and efficient heuristic approach for the multiple-depot vehicle scheduling problem. *Optimization Letters*, 10(7), 1449–1461. <https://doi.org/10.1007/s11590-015-0944-x>
- Gültekin, N., & Eren, T. (2014). Demiryolu Çizelgeleme Probleminin Modellenmesi ve Çözümü. *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(2), 235–242.
- Gündoğar, E., & Akıl, S. (1998). Servis Araçları Rotalama-Çizelgeleme Problemleri ve Çözüm Yaklaşımları. *Sakarya University Journal of Science*, 2(1), 25–30. <https://doi.org/10.5505/saufbed.v2i1.5000013399>
- Hamurcu, M., & Eren, T. (2018). Transportation planning with analytic hierarchy process and goal programming. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 2(2), 92–97.
- Hassold, S., & Ceder, A. (2014). Public transport vehicle scheduling featuring multiple vehicle types. *Transportation Research Part B*, 67, 129–143. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.04.009>
- He, F., Yang, J., & Li, M. (2018). Vehicle scheduling under stochastic trip times: An approximate dynamic programming approach.

Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 96, 144–159. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.09.010>

Huisman, D., Freling, R., & Wagelmans, A. P. M. (2004). A robust solution approach to the dynamic vehicle scheduling problem. *Transportation Science*, 38(4), 447–458. <https://doi.org/10.1287/trsc.1030.0069>

Ji, J., Bie, Y., & Shen, B. (2020). Vehicle Scheduling Model for an Electric Bus Line. *Proceedings of 3rd KES-STIS International Symposium, Smart Transportation Systems 2020*, 29–39.

Kaçmaz, Ö., Alakaş, H. M., & Eren, T. (2019). Shift scheduling with the goal programming method: A case study in the glass industry. *Mathematics*. <https://doi.org/10.3390/MATH7060561>

Kaçmaz, S. Ö., Alakaş, H. M., & Eren, T. (2020). Ergonomic staff scheduling problem with goal programming in glass industry. *Journal of Turkish Operations Management*, 4(1), 369–377.

Kim, B.-I., Kim, S., & Park, J. (2012). A school bus scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 218, 577–585.

Kıran, M. S., & Gündüz, M. (2012). Arı Kolonisi Optimizasyon Algoritması Kullanarak Şoför-Hat-Zaman Çizelgeleme. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 11(2), 59–66.

Liu, T., Ceder, A. (Avi), & Chowdhury, S. (2017). Integrated public transport timetable synchronization with vehicle scheduling. *Transportmetrica A: Transport Science*, 13(10), 932–954. <https://doi.org/10.1080/23249935.2017.1353555>

Lourenço, H. R., Paixao, J. P., & Portugal, R. (2001). Multiobjective Metaheuristics for the Bus-Driver Scheduling Problem.pdf. *Transportation Science*, 35(3), 331–342.

Mesquita, M., Paias, A., & Respício, A. (2009). Branching approaches for integrated vehicle and crew scheduling. *Public Trasnp. Journal*, 1(21), 21–37. <https://doi.org/10.1007/s12469-008-0005-2>

Nagy, V., & Horváth, B. (2020). The effects of autonomous buses to vehicle scheduling system. *Procedia Computer Science*, 170, 235–240. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.035>

Naumann, M., Suhl, L., & Kramkowski, S. (2011). A stochastic programming approach for robust vehicle scheduling in public bus transport. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 20(January), 826–835. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.08.091>

Orhan, İ., Kapanoğlu, M., & Karakoç, T. H. (2010). Havayolu Operasyonlarında Planlama ve Çizelgeleme. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(2), 181–191.

Orhan, İ., Kapanoğlu, M., & Karakoç, T. H. (2012). Hedef Programlama ile Bütünleşik Uçak Rotalama ve Bakım Çizelgeleme. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(1), 11–26. <https://doi.org/10.17341/gummfd.74431>

Özalp, M., & Öcalır, E. V. (2008). Türkiye’deki Kentiçi Ulaşım Planlaması Çalışmalarının Değerlendirilmesi (1). *Metu Jfa*, 2(25:2), 71–97.

Özcan, E. C., Varlı, E., & Eren, T. (2017). Hidroelektrik Santrallerde Vardiya Çizelgeleme Problemleri İçin Hedef Programlama Yaklaşımı. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 10(4), 363–370. <https://doi.org/10.17671/gazibtd.347609>

Özcan, U., & Toklu, B. (2009). Multiple-criteria decision-making in two-sided assembly line balancing: A goal programming and a fuzzy goal programming models. *Computers and Operations Research*, 36(6), 1955–1965. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2008.06.009>

Özder, E. H., & Eren, T. (2016). Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemi ve Hedef Programlama Teknikleri ile Tedarikçi Seçimi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 4(3), 196–196. <https://doi.org/10.15317/scitech.2016320515>

Perumal, S. S. G., Larsen, J., Lusby, R. M., Riis, M., & Christensen, T. R. L. (2020). A column generation approach for the driver scheduling problem with staff cars A column generation approach for the driver scheduling problem with staff cars. *30th European Conference On Operational Research*.

Schöbel, A. (2017). An eigenmodel for iterative line planning, timetabling and vehicle scheduling in public transportation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 74, 348–365. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.11.018>

Shui, X., Zuo, X., Chen, C., & Smith, A. E. (2015). A clonal selection algorithm for urban bus vehicle scheduling. *Applied Soft Computing Journal*, 36, 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.07.001>

Türkoğlu, S. P. (2017). KARAR VERMEDE HEDEF PROGRAMLAMA YÖNTEMİ VE UYGULAMALARI. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi İktisadi ve İdare Bilimler Fakültesi Dergisi*, 1(2), 29–46.

Ünal, F. M., & Eren, T. (2016). Hedef Programlama ile Nöbet Çizelgeleme Probleminin Çözümü. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 4(1). <https://doi.org/10.21541/apjes.59022>

- Uslu, B., Bedir, N., Gür, Ş., & Eren, T. (2018). 0-1 Hedef Programlama Yöntemi Kullanılarak Hemşire Çizelgeleme Probleminin Çözümü. *Sağlık Akademisi Kastamonu*, 3(3), 148–170.
- Varlı, E., Alağaç, H. M., Eren, T., & Özder, E. H. (2017). Goal Programming Solution of the Examiner Assignment Problem. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 1(2), 105–118.
- Varlı, E., & Eren, T. (2017). Hemşire Çizelgeleme Problemi ve Hastanede Bir Uygulama. *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 5(1), 34–40. <https://doi.org/10.21541/apjes.73975>
- Wen, M., Linde, E., Ropke, S., Mirchandani, P., & Larsen, A. (2016). An adaptive large neighborhood search heuristic for the Electric Vehicle Scheduling Problem. *Computers and Operations Research*, 76, 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.06.013>
- Yao, E., Liu, T., Lu, T., & Yang, Y. (2020). Optimization of electric vehicle scheduling with multiple vehicle types in public transport. *Sustainable Cities and Society*, 52. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101862>
- Zhao, X., Lu, J., Sun, H., & Hu, S. (2020). Two-way Vehicle Scheduling Approach in Public Transit Based on Tabu Search and Dynamic Programming Algorithm. *2020 IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Engineering, ICITE 2020*, 498–502. <https://doi.org/10.1109/ICITE50838.2020.9231516>
- Zuo, X., Chen, C., Tan, W., & Zhou, M. (2015). Vehicle Scheduling of an Urban Bus Line via an Improved Multiobjective Genetic Algorithm. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(2), 1030–1041. <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2352599>



Comparison of the Surface Quality of the Products Manufactured by the Plastic Injection Molding and SLA and FDM Method

Özgür Özdiilli 

Department of Machine and Metal Technology, Vocational School of Technical Sciences, Hitit University, TURKEY

Başvuru/Received: 02/07/2020

Kabul / Accepted: 17/02/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 17/02/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Abstract

Plastic injection molding is a widely used manufacturing method in the automotive and machinery sectors. The design and manufacture of the appropriate mold needed to manufacture a plastic product with this method are a difficult, time-consuming, and costly process. Due to the developing technology and increasing quality requirements, this method remains insufficient, especially for sensitive and intricate parts that will be manufactured in low numbers. In additive manufacturing, the 3D printing is developing rapidly, and high-quality products can now be obtained with this method. In this study, sample products manufactured by fused deposition modeling (FDM), stereolithography (SLA) were compared with products manufactured by the plastic injection molding method. Prototype products were examined in terms of manufacturing techniques, appearance, and surface qualities. The arithmetic mean surface roughness (Ra) value of the product manufactured with the SLA was 0.4 μm , while it was 1.059 μm for the injection molding product and 4.421 μm for the FDM product. As a result of the study, it was determined that the products manufactured by the SLA method were better in terms of the ease of manufacturing, appearance, and surface roughness and that this was followed by plastic injection molding and the 3D printing FDM method.

Key Words

“Plastic injection molding, 3D printer, additive manufacturing, stereolithography (SLA), fused deposition modelling (FDM), surface quality”

1. Introduction

The 3D printing technique is a method used in the manufacturing of mechanical products, and it has various advantages such as the manufacturing of complex geometries without the waste of material and the need for highly expensive molding machines and machining tools. When the number of parts to be manufactured is small, the manufacturing technique with 3D printers also reduces the high manufacturing cost and time (Asif et al. (2018)). In the additive manufacturing industry, the 3D manufacturing technique is also widely used in the manufacture of final products according to any shape, besides the use for prototype purposes. While the manufacturing of a part by the traditional method requires a lot of processes, the 3D printing technique enables it to be manufactured in a single step (Bekas et al. (2019)). With the advancement of additive manufacturing technology, products can be manufactured in a short time with 3D printing, and moreover, it provides a significant advantage by enabling the desired changes in product design. With the developing technology, cheaper and faster 3D printing techniques with a high print quality have been developed. Furthermore, the necessary polymer materials are now produced with more features. These developments are constantly expanding the design and usage areas of the products manufactured by the 3D method (Leon et al. (2016), Chapiro (2016), Dizon et al. (2018))

Durgun (2018) manufactured the part, which is also called the foot putting plastic and used for the purpose of protecting the automatic transmission center found in the foot putting area of the front passenger's side in automatic vehicles, directly using the 3D printing. Menderes et al. (2017) carried out mechanical and surface roughness analyses on the products manufactured with the FDM method by using PET-G material (Polyethylene Terephthalate Glycol). They stated that the linear filling technique was better, according to various filling geometries. In experiments on 3D products manufactured by three different methods, Barbara et al. detected that the samples manufactured by PolyJet printing had the best quality in terms of surface roughness (Li et al. (2017)). Many researchers examined the dimensional accuracy and surface quality of parts manufactured with FDM (Li et al. (2019), Dambatta et al. (2016)). Erol et al. (2018) manufactured a newly designed tire tread pattern prototype using SLA, Binder Jetting (3DP), and FDM technologies. They compared the quality, appearance, and manufacturing times of the resulting three-dimensional solid models. Many researchers compared different 3D printing methods in terms of many aspects, such as cost, surface quality, strength, etc. (Choudhari et al. (2016), Finnes (2015), Kim et al. (2008)). The quality of plastic products is determined by parameters such as strength, appearance, size quality, and surface roughness, according to the requirements in the place where they are used. A significant advantage of the SLA 3D printing method is that it can print high-resolution intricate details of small-scale features with surface quality similar to injection molded parts (Levy et al (2003), Chae et al. (2005)). There are many recent studies on the roughness and mechanical properties of products produced with 3D printers (Çevik et al. (2020), İpekçi et al. (2018), Menderes et al. (2017), Menderes et al. (2019)).

In this study, the manufacturing of the prototype product, the design of which was developed in the Solidworks environment, was carried out using different manufacturing methods having plastic injection molding, SLA and FDM technologies. The technical properties of the manufactured prototype products, such as roughness values and appearance, were examined comparatively.

2. Plastic Injection Molding

Plastic technology is one of the fastest developing industries in the world. One of the plastic manufacturing methods is the plastic injection molding method. Many every product used today and in the machinery industry contains plastic, and most of these products can be manufactured with the plastic injection molding. This molding technique is a well-known method used for manufacturing parts of different shapes and complex geometries. Plastic injection molding consists of four main processes.. These processes are filling, compression, cooling, and extraction processes. Plastic injection molding begins with sending plastic materials from the warehouse to the heating distribution system of the molding machine. By injection, the product is obtained by melting the plastic material used and filling the cavity in the mold with this molten plastic. Then, this product is cooled and extracted from the mold with ejectors (Tang et al. (2006)). The processing quality and surface roughness of plastic injection molds in the manufacture determine the surface quality of the piece obtained (Martinez et al. (2011)).

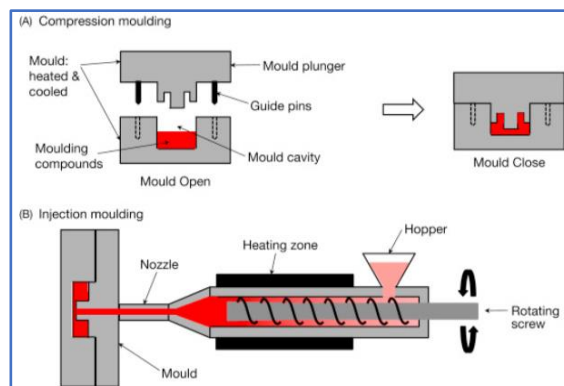


Figure 1. Plastic Enjection Molding (Wang et al. (2019))

3. Additive Manufacturing Technologies

3.1. Fused Deposition Modelling (FDM)

There are various methods of the 3D printing technique, depending on the layer creation style. The FDM method observed in Fig. 2. works with the principle of placing a plastic filament material on layers. For this technology, there is a need for the Standard Tessellation Language (STL) file format, which can be created with a computer-aided program. The necessary codes are created with another program to create the model, the melted plastic material is passed through the nozzle, and layers are formed as it hardens. Stepper motors are used in order to move the extrusion head three or more linearly (Kun et al. (2016)).

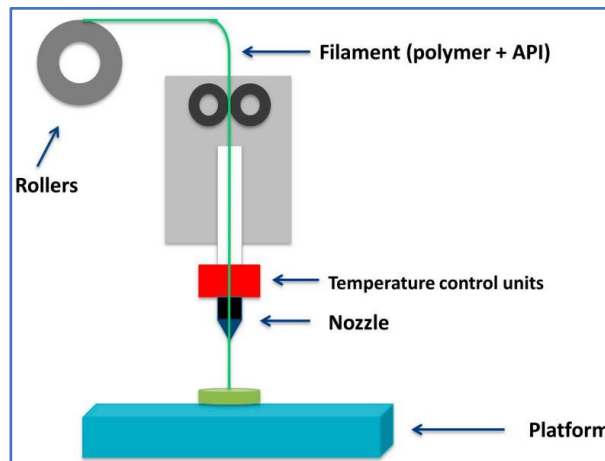


Figure 2. Fused deposition modelling (FDM) Printing system (Konta et al. (2017))

3.2. Stereolithography (SLA)

SLA is an additive manufacturing technology, in which, as seen in Fig. 3, a prepolymer is exposed to light and turns into a cured solid (Li et al. (2017)). Within 3D printing technologies, SLA has advantages such as higher precision, high forming speed and the production of complex parts. Due to the printing process technique, the mechanical properties of printed products are different. Since SLA technology is a liquid-to-solid conversion technique, the mechanical properties of the material are affected by various process parameters during the hardening of the plastic material. These parameters include structure style, layer thickness, supports, time passed after solidification, and laser power (Wang et al. (2020)).

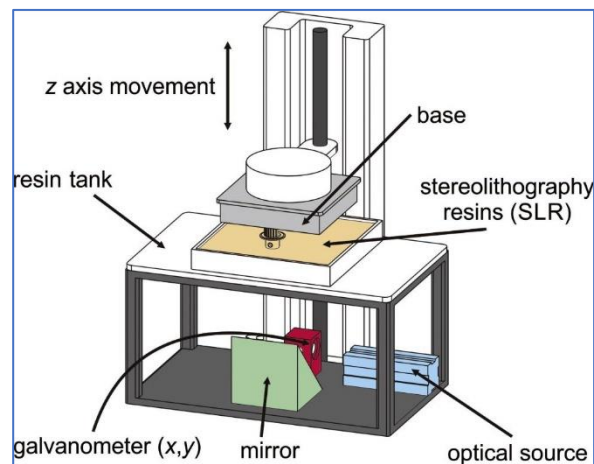


Figure 3. Stereolithography (SLA) (Weng et al. (2016))

The most critical parameters in SLA is the energy of the UV light to which the used resin is subjected and the varying thickness of the cured layers.

4. Material and Method

In this study, in order to manufacture the product with plastic injection molding, the mold shown in Fig. 4 was manufactured. The product mold was manufactured by machining using Computer-Aided Design (CAD) and Computer-Aided Manufacturing (CAM). The injection mold was formed from two main parts. A runner was mounted to melt the plastic material and transfer the plastic to the mold and fill the mold cavity, and ejectors were mounted to remove the solidified part. Mold parts were designed in the SolidWorks program, and in order to manufacture by the machining method on the CNC machine, G codes were derived in the SolidCAM program for the CNC milling machine having a Fanuc control unit. Since the text and logo formed on the product were thin and complex, it was created in the Electrical Discharge Machining (EDM) using a previously produced copper electrode.

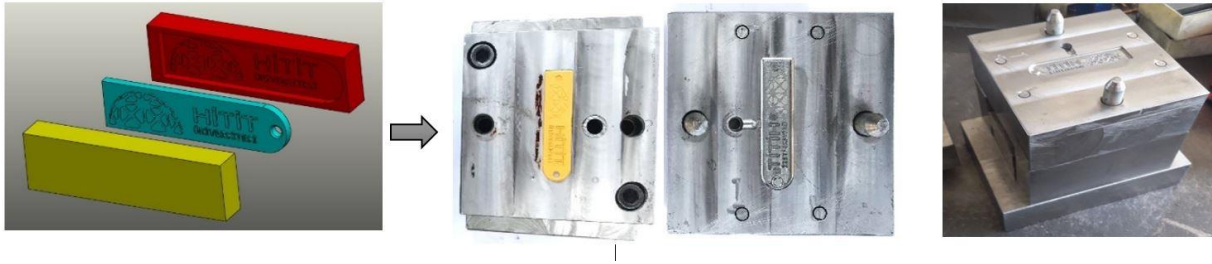
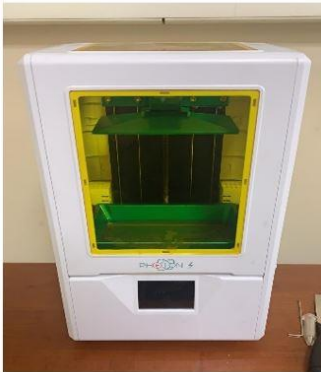


Figure 4. Plastic injection molding for pictures

The manufacturing of two different products to be compared was carried out by using the 3D printing method with the printing machines given in Fig. 5 and using the SLA and FDM methods.



Anycubic Photon-S UV 3D

- Printing technology: Stereolithography
- Light source: Ultraviolet integrated light
- Wave length: 405nm
- XY DPI: 47um (2550 * 1450)
- Y-axis resolution: 1.25um
- Layer resolution: 20 ~ 100um
- Layer thickness: 0.01-0.2mm
- Printing material: 405nm photosensitive resin



Creality ENDER 3 PRO 3D

- Printing technology: FDM
- Nozzle diameter: 0.4mm
- Slicer software: Cura / simplify3D / Repetier-host
- Format: Stl /obj / g-code
- Filament diameter: 1.75mm
- Filaments material: PLA, ABS, wood, TPU, carbon fiber

Figure 5. 3D printers in which the tested products were manufactured

In the study, products were manufactured with two different 3D printing techniques (FDM and SLA), and their surface qualities were compared. The surface roughness measurements were made with the Mitech MR200 Portable Surface Roughness Tester shown in Fig. 6. The technical characteristics of the roughness device are presented in Table 1. In order to compare the appearance quality well, especially fine and intricate patterns were formed in the sample piece design.

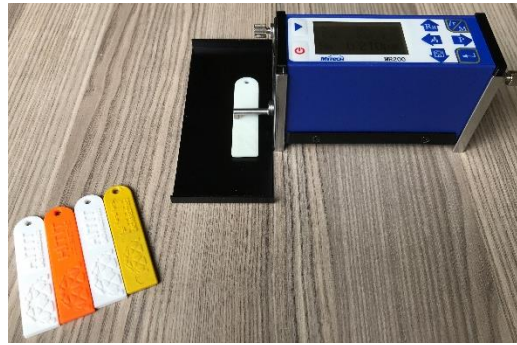


Figure 6. Roughness measuring device

Table 1. Roughness measuring device technique features

Name	Content	
Measuring range	Z Axis (Vertical)	160 μ m
	X Axis (Horizontal)	17.5mm
Resolution	Z Axis (Vertical)	0.01 μ m/ \pm 20 μ m
		0.02 μ m/ \pm 40 μ m
		0.04 μ m/ \pm 80 μ m
Measurement item	Parameters	Ra,Rq,Rz,Rt,Rp,Rv,RS,RSm,Rz(JIS),RSk,R3z,Rmax,Rpc
Filter		ISO,ANSI,DIN,JIS
Sampling length (lr)		RC,PC-RC,Gauss,D-P
Sampling length (lr)		0.25,0.8,2.5
Accuracy		Less than or equal to \pm 10%

The production processes of 3D printing and plastic injection molding methods are shown in Fig. 7. The part to be manufactured in both manufacturing methods is designed in a CAD program. However, while the 3D printing technique is a very short and easy process, the plastic injection molding technique is observed to be a multi-stage, long, and difficult process.

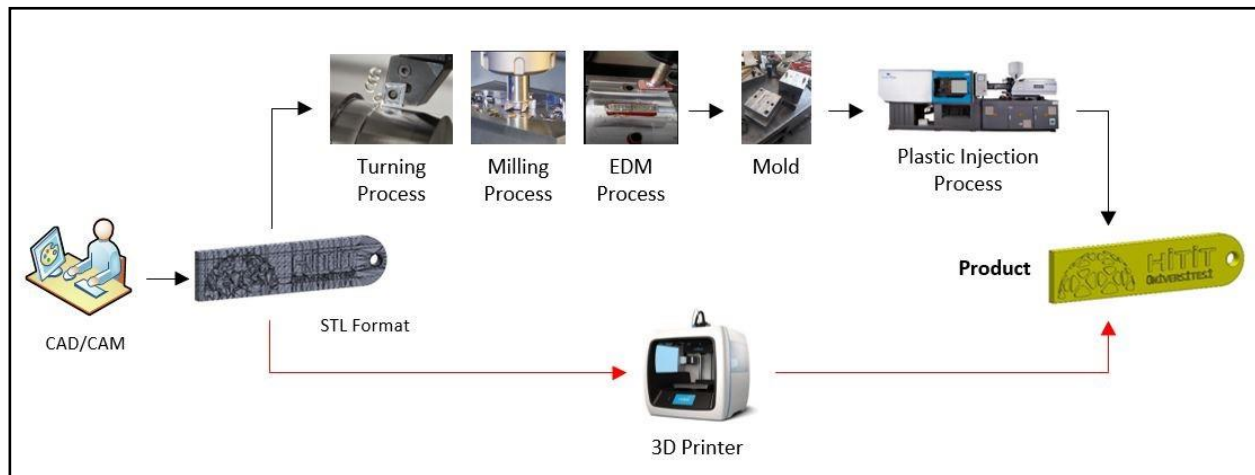


Figure 7. Comparison of plastic injection and 3D printing technique

To compare the appearance qualities and surface roughness of the products better, in addition to the roughness tests, the surfaces of the samples were magnified by a Nikon Eclipse LV150N microscope and examined more precisely. Thus, defects that could not be observed with the naked eye on the samples could be determined.



Figure 8. Motorized microscope for material testing

5. Result and Discussion

The images of the prototype products manufactured by three different methods in this study are presented in Fig. 9. In the images, in the examinations performed firstly with the naked eye, the trace formed by an edge radius tool while the mold is processed during the machining on the product manufactured by the plastic injection molding method is observed in Fig. 9-1. The traces of the ejector used to extract the part from the mold are observed in Fig. 9-2, and the circular tool traces that occurred, especially during surface cleaning while machining, are observed in Fig. 9-3. The filament traces used during 3D printing FDM manufacturing are observed in Fig. 9-4, and Fig. 9-5 shows that the letters could not have been emptied as a result of the lack of precision production. These disrupt the continuity of the product surface and increase roughness. However, changing the quality of the machinery and equipment used in the manufacturing of samples will also change the product surface quality.

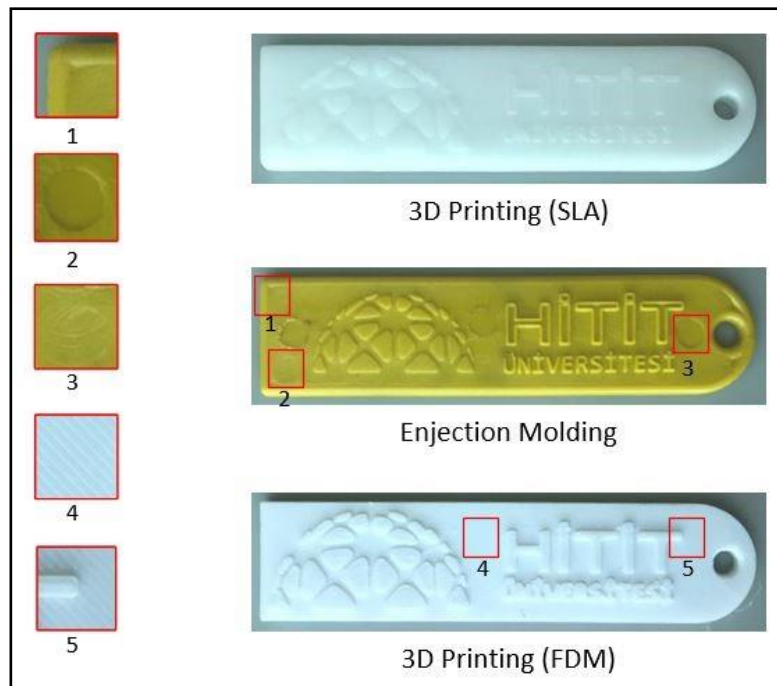


Figure 9. Images of the products manufactured by three different methods

The surfaces of the sample products were examined by magnification at different coefficients with the microscope used for the material surface test. The magnification rates and surface images of the samples are presented in Fig. 10. In the 50x magnified images, while minor scratches and point defects are observed in the SLA method, filament traces are observed as strips in the FDM method, and in the injection molding method, tool traces in the mold are observed as faults. These faults are observed more clearly as the image magnification ratio is increased. As a result of 500x and 1000x magnification, while the surface quality of the sample manufactured with the SLA method became clear, images could not be taken from other samples due to the problem of not becoming apparent.

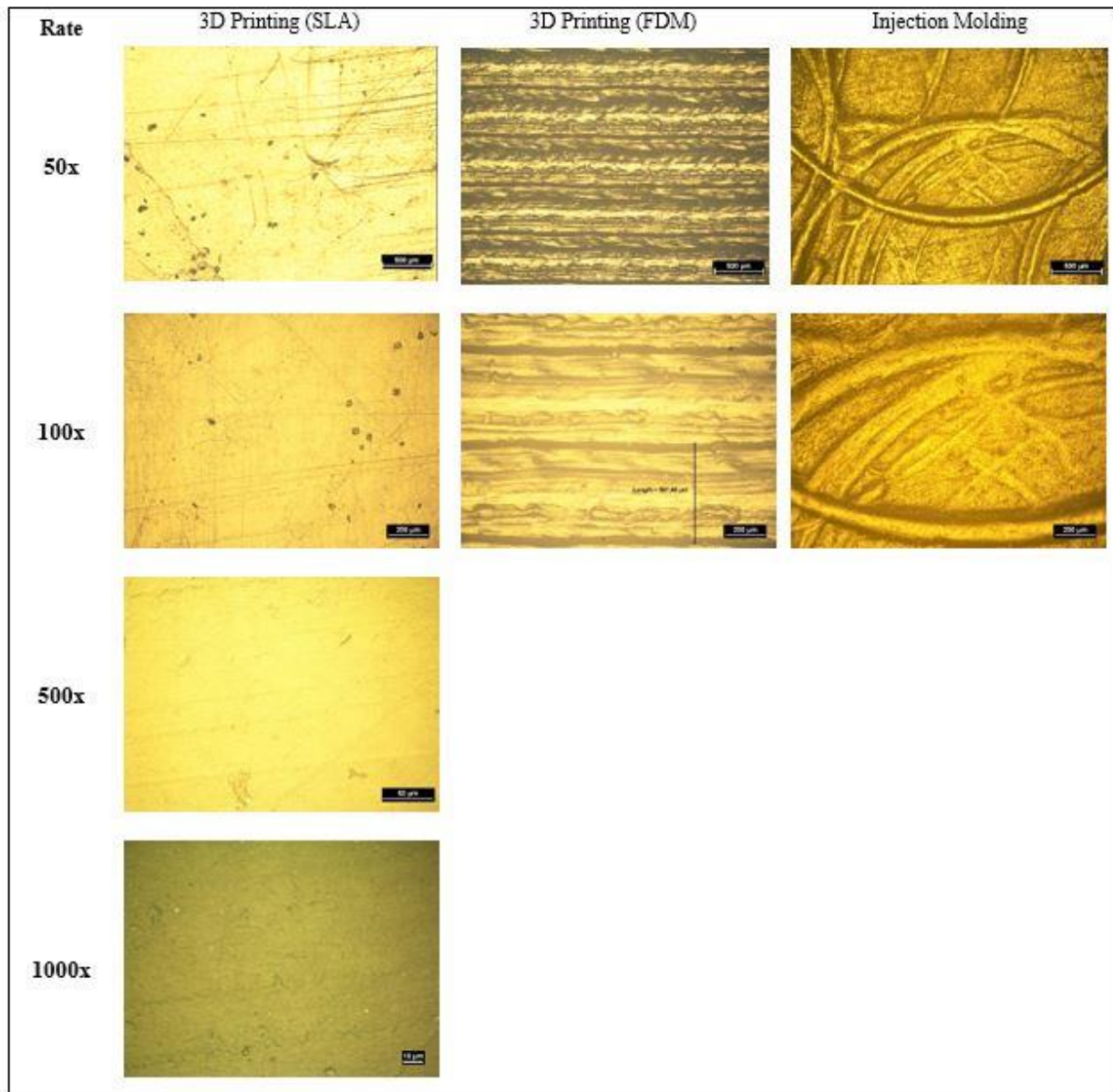


Figure 10. Micro images obtained by the microscope of the products manufactured with different methods

As seen in Table 2, the surface roughness arithmetic mean value (Ra) was measured to be 1.059 μm for injection molding, 4.421 μm for FDM with 3D printing, and 0.4 μm for SLA with 3D printing. The surface roughness value of the 3D printing SLA method is the lowest, which indicates the accuracy of the tests conducted with the eye and microscope.

Table 2. Surface roughness values of the products

	Ra (μm)	Rz (μm)	Rp (μm)	Rq (μm)	Rt (μm)	Rv (μm)	Rs (μm)
3D Printing (SLA)	0.4	2.265	1.132	0.504	3.0261	1.132	0.025
3D Printing (FDM)	4.421	1.847	0.343	5.805	28.71	1.503	0.032
Injection Molding	1.059	5.796	2.382	1.373	10.19	3.414	0.023

Fig. 11 shows the graphs obtained from the roughness measuring device program for three different samples. While the original line of the sample is observed in the first part of the graphs, in the bottom part, the line filtered by the RC method in the program is observed. The roughness measurement range amount was selected as $\pm 40 \mu\text{m}$.

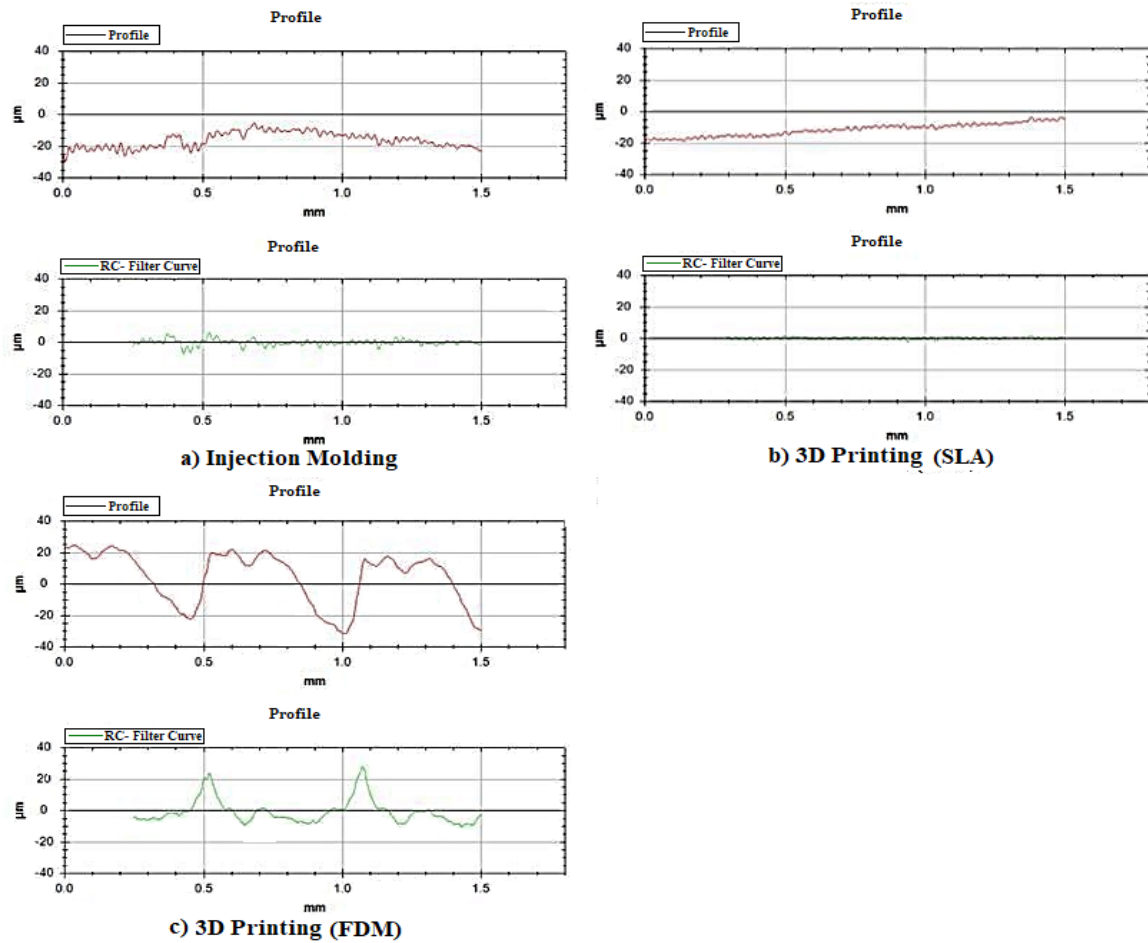


Figure 11. Surface roughness graphs of the products manufactured with different methods

6. Conclusions

The manufacture of the prototype product developed in this study was performed using different manufacturing techniques with the plastic injection molding method, SLA, and FDM technologies. When the results of the study are evaluated according to surface appearance and roughness, 3D printing SLA is found to be the best method, while injection molding and 3D printing FDM methods follow it in terms of surface quality. Manufacturing a plastic part by the injection molding method is costly and time-consuming, especially when the number of parts to be manufactured is low. Although the roughness value of the product manufactured with injection molding is close to SLA in terms of surface roughness, there are defects that can be observed even with the naked eye in different places due to the non-homogeneous structure on this product surface. The arithmetic mean surface roughness (R_a) value of the sample manufactured with the 3D printing SLA method was $0.4 \mu\text{m}$, while it was $1.059 \mu\text{m}$ for the injection molding sample and $4.421 \mu\text{m}$ for the FDM sample. From the surface images of the products obtained with plastic injection molding, it was determined that the faults (tool and ejector traces, etc.) that occurred during the manufacturing of the molds were reflected on the product as surface faults. Therefore, the surface roughness of the parts manufactured with this manufacturing method will vary according to the tool and machining cutting parameters used when machining the molds. In the 3D printing FDM method, the used filament form created discontinuity on the product, and the sensitive points in the design could not be obtained as desired. Therefore, in plastic products in which surface quality and roughness are important, the 3D printing SLA method can be preferred.

References

- Asif, M., Lee, J. H., Lin-Yip, M. J., Chiang, S., Levaslot, A., Giffney, T., ... & Aw, K. C. (2018). A new photopolymer extrusion 5-axis 3D printer. *Additive Manufacturing*, 23, 355-361.
- Bekas, D. G., Hou, Y., Liu, Y., & Panesar, A. (2019). 3D printing to enable multifunctionality in polymer-based composites: A review. *Composites Part B: Engineering*, 179, 107540.

- Çevik, Ü., & Kam, M. (2020). A Review Study on Mechanical Properties of Obtained Products by FDM Method and Metal/Polymer Composite Filament Production. *Journal of Nanomaterials*, 2020.
- Chae, M. P., Rozen, W. M., McMenamain, P. G., Findlay, M. W., Spychal, R. T., & Hunter-Smith, D. J. (2015). Emerging applications of bedside 3D printing in plastic surgery. *Frontiers in surgery*, 2, 25.
- Chapiro, M. (2016). Current achievements and future outlook for composites in 3D printing. *Reinforced Plastics*, 60(6), 372-375.
- Choudhari, C. M., & Patil, V. D. (2016, September). Product development and its comparative analysis by SLA, SLS and FDM rapid prototyping processes. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 149, No. 1, p. 012009). IOP Publishing.
- Dambatta, Y. S., & Sarhan, A. A. (2016). Surface roughness analysis, modelling and prediction in fused deposition modelling additive manufacturing technology. *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*, 10(8), 1582-1589.
- De Leon, A. C., Chen, Q., Palaganas, N. B., Palaganas, J. O., Manapat, J., & Advincula, R. C. (2016). High performance polymer nanocomposites for additive manufacturing applications. *Reactive and Functional Polymers*, 103, 141-155.
- Derviş, E. R. O. L., Doğan, B., & Bozdemir, M. The Experimental Study on Examination of the Usability of Three Dimensional Printing Technologies in Tread Pattern Design of Vehicle Tires. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD)*, 6(1), 62-69.
- Dizon, J. R. C., Espera Jr, A. H., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2018). Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*, 20, 44-67.
- Durdun, I. (2018). Direct Digital Manufacturing in Automotive Product Development. *Journal of Advanced Technology Sciences*, 7(1), 90-96.
- Finnes, T. (2015). High definition 3d printing—comparing SLA and FDM printing technologies. *The Journal of Undergraduate Research*, 13(1), 3.
- İpekçi, A., Kam, M., & Saruhan, H. (2018). Investigation of 3D printing occupancy rates effect on mechanical properties and surface roughness of PET-G material products. *Journal of New Results in Science*, 7(2), 1-8.
- Kam, M., Saruhan, H., & İpekçi, A. (2018). Investigation the effects of 3D printer system vibrations on mechanical properties of the printed products. *Sigma J. Eng and Nat. Sci*, 36(3), 655-666.
- Konta, A. A., García-Piña, M., & Serrano, D. R. (2017). Personalised 3D printed medicines: which techniques and polymers are more successful?. *Bioengineering*, 4(4), 79.
- Kun, K. (2016). Reconstruction and development of a 3D printer using FDM technology. *Procedia Engineering*, 149, 203-211.
- Levy, G. N., Schindel, R., & Kruth, J. P. (2003). Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. *CIRP annals*, 52(2), 589-609.
- Li, L., Haghghi, A., & Yang, Y. (2019). Theoretical modelling and prediction of surface roughness for hybrid additive–subtractive manufacturing processes. *IISE Transactions*, 51(2), 124-135.
- Li, Y., Linke, B. S., Voet, H., Falk, B., Schmitt, R., & Lam, M. (2017). Cost, sustainability and surface roughness quality—A comprehensive analysis of products made with personal 3D printers. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 16, 1-11.
- Martínez-Mateo, I., Carrión-Vilches, F. J., Sanes, J., & Bermúdez, M. D. (2011). Surface damage of mold steel and its influence on surface roughness of injection molded plastic parts. *Wear*, 271(9-10), 2512-2516.
- Menderes, K. A. M., İpekçi, A., & Saruhan, H. (2017). Investigation of 3d printing filling structures effect on mechanical properties and surface roughness of PET-G material products. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 6(Özel Sayı (ISMSIT2017)), 114-121.
- Menderes, K. A. M., Saruhan, H., & İpekçi, A. (2019). Investigation the effect of 3d printer system vibrations on surface roughness of the printed products. *Duzce University Journal of Science and Technology*, 7(2), 147-157.
- Tang, S. H., Kong, Y. M., Sapuan, S. M., Samin, R., & Sulaiman, S. (2006). Design and thermal analysis of plastic injection mould. *Journal of materials processing technology*, 171(2), 259-267.

Wang, M., Guo, L., & Sun, H. (2019). Manufacture of biomaterials. Reference Module in Biomedical Sciences: Encyclopedia of Biomedical Engineering.

Wang, S., Ma, Y., Deng, Z., Zhang, K., & Dai, S. (2020). Implementation of an elastoplastic constitutive model for 3D-printed materials fabricated by stereolithography. *Additive Manufacturing*, 33, 101104.

Weng, Z., Zhou, Y., Lin, W., Senthil, T., & Wu, L. (2016). Structure-property relationship of nano enhanced stereolithography resin for desktop SLA 3D printer Part A *Applied science and manufacturing*.



Kompozit Yamalar ile Tamir Edilmiş Çatlaklı Sandviç Kirişlerin Eğilme Darbe Davranışları

Flexural impact Response of Cracked Sandwich Beams Repaired by Composite Patches

Umut Çalışkan^{1*}, Recep Ekici¹, M. Kemal Apalak¹

¹Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 38039 Kayseri, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 25/12/2020

Kabul / Accepted: 22/03/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 22/03/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Bu çalışma, deneysel ve sayısal olarak kompozit yamalar ile tamir edilen çatlaklı sandviç kirişlerin eğilme darbe davranışını araştırmaktadır. Sandviç kiriş elemanları yüzey tabakaları, cam elyaf takviyeli kompozit, köpük çekirdek, PVC malzeme ve yapıştırıcı tabakalardır. Üst yüzey tabakasına çatlak oluşturularak hasar verilmiştir ve kompozit yama yapıştırılarak tamir edilmiştir. Düşük hızlı darbe davranışı, farklı yama malzemeleri, kalınlıkları ve darbe enerjileri açısından incelenmiştir. Sayısal darbe analizleri, kompozit sandviç kirişin hasar davranışını modellemek ve deneysel darbe testi sonuçlarını karşılaştırmak için yapılmıştır. PYTHON program dili ile parametrik modelleneme yapılmıştır. Sonlu elemanlar alt programı ABAQUS-VUMAT kullanılarak 3B Hashin hasar modelleri kompozit yama ve yüzey tabakalarına uygulanmıştır. Son olarak, hasarlı kirişin eğilme rijitliği yama uygulaması ile artırılmıştır. Sandviç kirişlerin hasar toleransları, temas kuvveti değişimleri, kinetik enerji varyasyonları ve darbe sonrası hasar modları dikkate alınarak farklı yama parametreleri için belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Kompozit sandviç kiriş, eğilme darbesi, 3B hasar analizi, yama uygulaması”

Abstract

This study focused on the flexural impact response of cracked sandwich beams repaired by composite patches experimentally and numerically. The sandwich beam members are face-sheets, glass-fiber reinforced plastic (GFRP) composite material, foam core, PVC material, and adhesive layer. The cracked was created on the surface of the top face-sheet to damage it and it was repaired by bonding external composite patch. Low-velocity impact response was investigated in terms of different patch materials, thicknesses, and impact energies. The impact analysis was performed to model the damage behavior of the composite sandwich beam and to compare experimental impact test results. 3D Hashin damage models were used to obtain damage characteristic of composite laminates with patch application using the explicit finite element subroutine ABAQUS-VUMAT with scripting language via PYTHON programme language. Finally, the bending stiffness of the cracked beam was increased using the patch application. Damage tolerances of sandwich beams were determined for different patch parameters considering contact force variations, kinetic energy variations and after-impact damage modes.

Key Words

“Composite sandwich beam, flexural impact, 3D damage analysis, patch application”

1. Giriş

Kompozit malzemeler sağladıkları pek çok avantaj sayesinde havacılık endüstrisinde, deniz araçlarında, otomotiv sektöründe, yenilenebilir enerji, savunma sanayi ve bunun gibi birçok alanda etkin olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte kompozitlerin onarım yöntemleri de sektöre bağlı olarak gelişme göstermiştir. Özellikle havacılık sektöründe kullanılan sandviç panellerin kompozit malzemeler ile tamir edilmesi, uygulanabilirlik ve kazandırdığı dayanım açısından son derece başarılı olmuştur. Kompozit malzemelerde onarım isteği iki farklı nedenden dolayı ortaya çıkar. Bunlardan en temeli, kullanımdan kaynaklı oluşan deformasyonlar ve darbeye bağlı uğramış olduğu hasarlardan dolayıdır. Bir diğeri ise de çok sık görülmese de malzemenin üretiminde ve tasarımı yetersizliğinden dolayı yapılan onarımlardır. Böyle durumlarda deforme olmuş bölgeden kaynaklı kullanıma elverişsiz olma durumu yalnızca hasarlı bölge tamir edilerek giderilir ve malzeme orijinaline yakın bir mukavemet değerine ulaşmış olur. Onarım işlemleri sayesinde; yeniden üretim, zaman ve maddi yönlerden çok büyük anlamda kazanımlar ve kolaylıklar sağlamaktadır.

Kompozit yamalarla tamir tekniği bir çok araştırmacı tarafından deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Balaganesan ve Khan (Balaganesan vd., 2016) yakın zamanlarda darbe yüklerine maruz kalan tamir edilmiş kompozit levhaların enerji sönümlemesini araştırmışlardır. 'n' adet katmanla üretilmiş kompozit plaka için 'n+1' adet tabakadan oluşan kompozit yama kullanmışlardır. Kompozit yama ile tamir edilmiş kompozit plakalar merkezinden ve farklı bölgelerinden balistik testine maruz tutulmuştur. Numunelerin enerji sönümlemesi ve darbe hasarı için analizler yapılmıştır. Numerik analizlerle tamir edilen kompozit plakaların enerji sönümleme etme kapasitesi ortaya konulmuştur. Deneysel ve nümerik sonuçlar oldukça uyumludur. Literatürde kompozit yamalar kullanılarak birçok malzemenin ve özellikle kompozit malzemelerin tamir edilmesi ve bunların performanslarını ortaya koyan çalışmalar mevcuttur. Mall ve Conley (Mall & Conley, 2009) kompozit yamalar kullanılarak tamir edilen hasara uğramış ince ve kalın metalik panellerin modellenmesini ve doğrulamasını araştırmışlardır. İki boyutlu sonlu elemanlar analizi kullanılarak sunulan çalışmada kompozit yamalar kullanılarak tamir edilen metal panellerin hasar gelişimi tahmini yapılmıştır. Önceden hasara uğrayan alüminyum numunelerin yorulma testleri iki farklı kalınlıktaki (1 ve 6.35 mm) alüminyum numuneler için yapılmıştır. Tahmin edilen yorulma hasar gelişim oranları deneysel ve sayısal değerlerle uyumlu çıkmıştır. Shams ve El-Hajjar (Shams & El-Hajjar, 2013) karbon fiber/epoksi tabakalı kompozitlerde hasarı yamalarla kapatarak tamir edilmesini sayısal ve deneysel olarak çalışmışlardır. Çizik şeklinde bulunan hasar, sonlu elemanlar programına tabaka tabak modellenerek aktarılmıştır ve yamalar katmanların gerilme durumu göz önüne alınarak yerleştirilmiş ve analizler yapılmıştır. Sonuçlar gösterdi ki yüzeye paralel yöndeki katman içi hasar gelişimi tamir parametrelerinin dikkatli seçimi ile yavaşlamıştır. Albedah vd. (Albedah vd., 2016) kompozit yamalar ile tamir edilen çatlak içeren alüminyum plakaların yorulma ömründe yük değişiminin etkisini araştırmışlardır. V şeklinde çentik açılan alüminyum 2024T3 ve 7075T6 alaşımlı numunelerin yorulma davranışları kompozit yamalar ile tamir edilerek deneysel olarak çalışılmıştır. Çentik açıldıktan sonra kompozit yama bir yapıştırıcı yardımı ile birleştirilmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki yorulma yük değeri arttıkça kompozit yama ile tamir edildikten sonra numunelerde hasar ilerlemesi her iki alüminyum alaşımı içinde yavaşlamıştır.

Cheng vd. (Cheng vd., 2014) kompozit yamalar ile tamir edilen malzemelerin çekme davranışlarına deneysel olarak karar vermişlerdir. Çentikli kompozit plakaların yamalar ile tamir edilmesi sonucu çekme testi altında yük taşıma kapasitesini ve hasar proseslerini araştırmışlardır. Sonuçlar ortaya koymuştur ki tamir edilen malzemelerin hasar gelişimi yalnızca yamanın setliğine rijitliğine bağlı değildir aynı zaman da katman sırasına da bağlıdır. Tamir edilen malzemelerin hasar tipleri görsel muayene ve ses emilimi ile ortaya konulmuştur. Constantin vd. (Constantin vd., 2013) kompozit yamaların yapıştırılması ile tamir edilen alüminyum panellerin mekanik performanslarını araştırmışlardır. Numerik analizler deneysel sonuçlar kullanılarak kıyaslanmış ve tutarlı sonuçlar elde etmişlerdir. Sayısal çalışma doğrulandıktan sonra çeşitli yama konfigürasyonları ile çalışmalar sürdürülmüştür. Yamanın yapıştırılmasında kullanılan yapıştırıcı tabakası modellenmiş ve gerilme dağılımlar dikkate alınarak yama konfigürasyonları çalışılmıştır. Errouane vd. (Errouane vd., 2014) çekme altındaki çatlak barındıran alüminyum plakaların kompozit yamalar ile tamirinin dizayn optimizasyonu için nümerik olarak çalışma yapmışlardır. Çalışma sonlu elemanlar metodu kullanılarak çatlak bölgesindeki gerilme yoğunluğu faktörünün tespiti açısından güzel sonuçlar vermiştir. Model doğrulandıktan sonra çeşitli yama konfigürasyonlarının ağırlık, genişlik ve kalınlık gibi analizler yapılmıştır. Bu yama konfigürasyonları da farklı çatlak boyutları altında gerçekleştirilmiştir ve çekme altında çatlak ilerlemesinde yama kullanımı oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Benyahia vd. (Benyahia vd., 2015) alüminyum 7075 T6 alaşımlı malzemelerde kompozit yamaların yapıştırılması ile tamir edilmesini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Kompozit yamalar yaşlandırma işlemine maruz bırakılarak hem yaşlandırılmış hem de yaşlandırılmamış numuneler için sayısal ve deneysel testler yapılmıştır. Deneysel çalışma göstermiştir ki kompozit yama ile tamir edilen malzemelerin yorulma ömrü uzamıştır. Yaşlandırılmış yamalar ile tamir edilen malzemelerin dayanımının azaldığı görülmektedir. Kompozit yamalar çatlak bölgesindeki gerilme yoğunluğu faktörünü azaltmıştır ve yapıştırıcı bölgesindeki gerilme büyüklükleri de azalmıştır. Sabelkin vd. (Sabelkin vd., 2007) kompozit yamaların yapıştırılması ile tamir edilen çatlak içeren alüminyum plakaları araştırmışlardır. Çatlak bulunan Alüminyum 7075-T6 panellerin mekanik ve yorulma gibi davranışları kompozit yamalar yapıştırılarak deneysel ve analitik olarak araştırmışlardır. Çatlak etrafında şekil değiştirme dağılımı, düzlem dışı deformasyon ve artık gerilme dağılımı ortaya konulmuştur. Çalışmanın sonucunda yamaların yapıştırılması ile tamir edilen yapıların yorulma ömrü açısından kalıcı dayanımı artış göstermiştir. Khalili vd. (Khalili vd., 2009) kompozit yamalar kullanılarak tamir edilen çatlak içeren alüminyum plakaların çentik darbe testi davranışlarını deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında karbon ve cam fiber takviyeli iki farklı yama malzemesi ve iki farklı katman sayısı 3 ve 5 olarak kullanmışlardır. Çatlak içeren alüminyum plakalarda ise 3 farklı çatlak boyu kullanmışlardır. Enerji sönümleme özellikleri araştırılan farklı konfigürasyonlar karşılaştırıldığında, 5 tabakalı karbon fiber içeren yama daha iyi sonuçlar vermiştir. Kwon ve Hall (Kwon & Hall, 2015) kompozit yamalarla tamir edilen çatlak içeren ince sertleştirilmiş plakaların analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Tek taraflı kompozit yama kullanarak tip I şekil değiştirme enerjisi oranı önceden tahmin etmek analitik model geliştirmişlerdir. Bunun yanında

sonlu elemanlar metodunu kullanarak da tip I şekil değiştirme enerjisi oranını tahmin etmişlerdir ve analitik sonuçlarla karşılaştırmışlardır, tutarlı sonuçlar elde etmişlerdir.

Yukarıda anlatılan açık literatür özetinde, araştırmanın önemi açıkça belirtilmektedir. Kompozit malzemeler hayatımızda bu kadar önemli iken tamirleri de bir o kadar önem arz etmektedir. Literatürde kompozit yamalar kullanılarak tamir edilme prosesi açıkça görülmektedir ve bu şekilde bir uygulama oldukça yaygındır. Tamir edilen malzemelerin tamir sonrası darbe davranışı performanslarının ortaya konulması ile kompozit malzemelerin hasar tipleri irdelenmiş ve yorumlanmıştır. Çalışmada 3 boyutlu sonlu elemanlar metodu kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sandviç yapının sayısal modeli ilerleyen bölümlerde detaylıca anlatılmıştır. Çalışma sonucunda ise deneysel ve sayısal sonuçlar uyumlu olmuş, hasarlı kırıların darbe enerjisini sönmüleme kabiliyeti açıkça görülmüştür.

2. Materyal ve Metot

2.1. Deneysel Yöntem

Kompozit yamalar yapıştırılarak tamir edilen çatlaklı kompozit sandviç kırıların düşük hızlı darbe testleri, oda koşullarında Fractovis Plus düşük hızlı darbe test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Sandviç kırıların üst plakası ortadan kırılarak hasar oluşturulmuştur. Onarılmış kompozit yüzey plakaların düşük hızlı darbe performansı, farklı yama fiber malzemeleri (cam elyaf ve karbon elyaf) ve 1 ve 2 mm yama kalınlığı için 10, 20 ve 40 J'luk üç farklı darbe enerjisi altında araştırılmıştır. Test numuneleri darbe cihazına monte etmek için aparatlar tasarlanmış ve üretilmiştir. Darbe testleri 10, 20 ve 40 J darbe enerjileri için en az iki kez tekrarlanmıştır. Hasarlı yüzey plakaları için cam elyaf kumaşlar kullanılmıştır. Yama malzemeleri ise endüstride yaygın olarak kullanılan karbon ve cam elyaf kumaş olarak seçilmiştir. Kompozit yamalar, % 64 (karbon fiber) ve % 54 (cam) hacim fraksiyonu ile bir ortak matris, epoksi ve yaklaşık 1 mm (4 katman) ve 2 mm (8 katman) ile güçlendirilmiş vakum destekli reçine infüzyon işlemi ile üretilmiştir. Sandviç kırıların çekirdek malzemesi 10 mm kalınlığında AIREX C70 serisi PVC köpük seçilmiştir. Deneysel testler için 10 mm çapında, 5.302 kg kütleli ve silindirik uç geometrisine sahip bir vurucu kullanılmıştır.

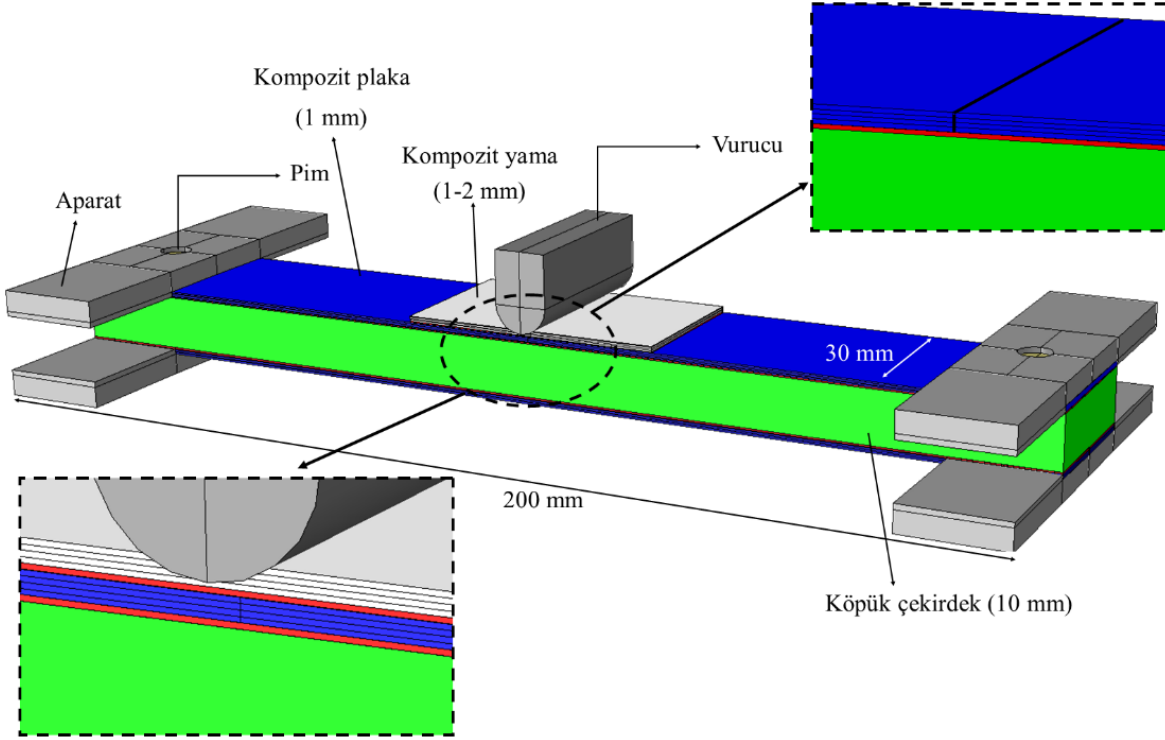
Bu çalışmada, cam ve karbon fiber yamalar, darbe enerjisi sönmüleme kapasitesi ve hasar toleransı açısından araştırmak için kullanılmıştır. Yama malzemesi etkisine ek olarak yama kalınlığı etkisi de incelenmiştir. Hasarlı sandviç kırı malzemeleri ve numune ile yama malzemesi, literatürde önemli bir yere sahip olan ve ticari ismi ARALDITE 2015 olan bir yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Yapıştırma işlemi uygulanmadan önce plakaların yapışma kalitesini olumsuz etkileyen kirleri çıkarmak için etanol (C₂H₆O) kullanılmıştır. Mümkün olduğunca fazla hava kabarcığı olmaksızın eşit bir yapışkan kalınlığı elde etmek için yamalar ve hasarlı kırı arasındaki yapışkan tabakaya eşit bir basınç uygulanmıştır. Bu amaçla, daha iyi bir yapıştırma kalitesi sağlamak için bir yapıştırma aparatı tasarlanmış ve üretilmiştir. Kalınlık belirlemek için pimler kullanılarak yapıştırıcı kalınlığının 0,25 mm olması sağlanmıştır.

2.2. Sayısal Yöntem

Kompozit yamalar ile tamir edilen hasarlı kompozit sandviç kırıların darbe yükleri altındaki dinamik davranışı ABAQUS / Explicit® kullanılarak araştırılmıştır (Abaqus). Tamir edilmiş sandviçlerin darbe enerjisi sönmüleme kabiliyetini geliştirmek için tasarım parametrelerinin etkileri de araştırılmıştır. Kompozit yama ile tamir edilmiş hasarlı sandviç kırıların sonlu eleman modeli Şekil 1'de gösterilmiştir. Vurucu, geometrik bir süreksizliğe sebebiyet vermemesi ve düzgün bir eğilme durumu oluşturması için silindirik uçlu seçilmiştir. Rijit malzeme davranışı ve 3 boyutlu rijit elemanlar (R3D4) ile modellenmiştir. Vurucu ve numune arasında Mekanik temas algoritması olarak GENEL TEMAS ALGORİTMASI kullanılmıştır. Kompozit yüzey plakaları, 3B katı elemanlar (C3D8R), ortotropik elastik malzeme modeli ve kullanıcı tanımlı hasar modeli kullanılarak modellenmiştir. Kohezif bölge modeli 0.25 mm kalınlığındaki yapıştırıcı tabakaya uygulanmıştır. Kohezif bölge modelinde kullanılan Araldite 2015 yapıştırıcı malzemesinin mekanik özellikleri Tablo 1'te verilmiştir. Analizler, farklı darbe enerjileri altında farklı fiber yama malzemesi ve kalınlıkları için tekrarlanmıştır.

Tablo 1. ARALDITE 2015'in kohezif parametreleri ve mekanik özellikleri (Carneiro & Campilho, 2017)

Malzeme	Araldite 2015
Elastiklik Modülü (GPa),E	1.85
Kayma Modülü (GPa),G	0.56
Ayrılma Gerilmesi (Normal,MPa), t_n^0	21.63
Ayrılma Gerilmesi (Kayma,MPa), t_s^0	17.9
Ayrılma Tokluğu (Normal,N/mm), G_n^c	0.43
Ayrılma Tokluğu (Normal,N/mm), G_s^c	4.70

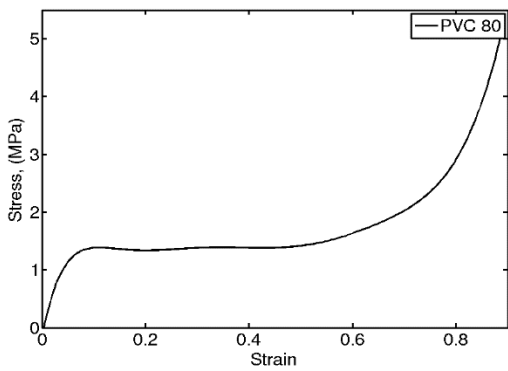


Şekil 1. Sayısal model ve ölçüleri

Günümüzde polimerik köpük malzemeleri oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Köpük malzemelerinin en belirgin karakteristik özellikleri; elastikiyet, hafiflik, rijitlik, yüksek gözeneklilik, yüksek çarpışma ve iyi enerji sönümlenme yeteneğidir. Malzemelerin mekanik özellikleri köpük yapısına, köpük yoğunluğu ve geometrik özelliklerine göre değişir. Bu çalışmada kapalı hücreli PVC köpük malzemesi ABAQUS'ta modellemek için, 'Crushable Foam' modeli plastik davranış kullanılmıştır. Bir kapalı hücreli köpük malzemesinin akma yüzeyi şu şekilde tariflenmiştir (Zhou, 2012).

$$\varphi = \frac{1}{[1+(\frac{\alpha}{3})^2]} [q^2 + \alpha^2 \sigma_m^2] - \sigma_y^2 \leq 0 \quad (1)$$

Çalışmada kullanılan köpük malzemesinin basma testi sonucu elde edilen gerilme şekil değiştirme eğrisi ve mekanik özellikleri Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. PVC C70.75 Köpük malzemesinin gerilme şekil değiştirme eğrisi ve mekanik özellikleri

Özellik	PVC Airex C70.75
Yoğunluk (kg/m ³)	80
Basma Modülü (MPa)	104
Basma Mukavemeti (MPa)	1.45
Çekme Modülü (MPa)	66
Çekme Mukavemeti (MPa)	2.0
Kayma Modülü (MPa)	30
Kayma Mukavemeti (MPa)	1.2

Hasar Kriterleri ve Sayısal Modele Uyarlanması:

Kompozit tabakaların üç boyutlu hasar davranışı, kullanıcı tanımlı malzeme modeli kullanılarak modellenmiştir. Bu model, çekme ve basma yükleri altındaki fiber ve matris hasarını içermektedir. VUMAT kullanıcı tanımlı malzeme modeli, hasarın başlamasını ve ilerlemesini öngören ortotropik bir malzeme modeli olarak kullanılmıştır. Kriterler aşağıda formüle edilmiştir (Hashin, 1980).

Fiber çekme hasarı:

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \frac{1}{S_{12}^2}(\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2) \geq 1 \quad (2)$$

Fiber basma hasarı:

$$F_f^c = \left(\frac{\sigma_1}{X_C}\right)^2 \quad (3)$$

Matris çekme hasarı:

$$\left(\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{Y_T^c}\right)^2 + \frac{(\tau_{23}^2 - \sigma_2 \sigma_3)}{S_{23}^2} + \frac{(\tau_{12}^2 - \tau_{13}^2)}{S_{12}^2} \geq 1 \quad (4)$$

Matris basma hasarı:

$$\frac{\sigma_2}{Y_C} \left[\left(\frac{Y_C}{2S_{23}}\right)^2 - 1 \right] + \left(\frac{\sigma_2}{2S_{23}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geq 1 \quad (5)$$

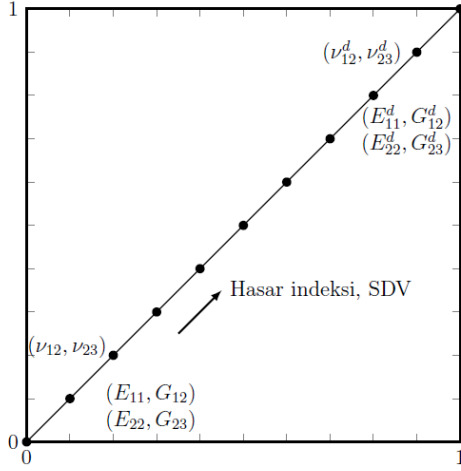
1, 2 ve 3 yönleri sırasıyla fiber, düşey ve kalınlık boyunca yönü tarif etmektedir. X_T fiber yönünde en büyük normal gerilme, X_C fiber boyunca basma mukavemetini, S_{12} katmanların kayma gerilmesi değeri olup deneysel olarak tespit edilen sabit değerlerdir. σ_1 , τ_{12} ve τ_{13} analizler sırasında çözüm adımlarından elde edilen gerilmeler olup sırasıyla fiber yönündeki normal gerilme değerini, 1-2 ve 1-3 düzlemlerindeki kayma gerilmelerini temsil etmektedir. Bu hasar kriterinin uygulanabilmesi için $\sigma_1 > 0$ olması gerekmektedir. Çalışmada kullanılan kompozit malzemelerin mekanik özellikleri ve hasar parametreleri Tablo 2’de verilmiştir.

Kompozit yamalar ile tamir edilmiş sandviç kirişlerin darbe analizlerinde kompozit plakalarda, fiber için basma ve çekme altındaki, matris için basma ve çekme altındaki hasar kriterleri kullanılmıştır. Hasar kriterleri ABAQUS yazılımına uygun kullanıcı tanımlı malzeme modeli FORTRAN dilinde, VUMAT alt kodu yazılarak uygulanmıştır. ABAQUS ilk yük iterasyonunu yapar, iterasyon sonunda hasar kriterlerinde kullanılacak parametreleri hesaplar. Malzemeye ait deneysel sabitler FORTRAN alt programında kullanılmıştır. Hasar kriterleri her bir yük iterasyonu sonunda ABAQUS tarafından her bir integrasyon noktasında hesaplanır ve yorumlanır. Hasar kriterine göre her bir integrasyon noktasında gerekli parametreler kullanılarak hesaplamalar yapılır. ABAQUS tarafında SDV olarak tariflenen hasar kriterleri [0 – 1] arasında indeks değişkenine göre hesaplanır. SDV’nin 1 olması demek artık o integrasyon noktası ile ilgili hasar kriterinde hasara uğradığı (fail) anlamına gelir. SDV’lere yazılan indekslere göre bir bozunum kuralı oluşturulmuş ve kompozit malzemenin mekanik özelliklerine aktarılmıştır.

Tablo 2. Kompozit malzemelerin (Cam fiber/epoksi ve Karbon fiber/epoksi) mekanik özellikleri (Singh, 2015)

Özellik	Cam fiber/epoksi	Karbon fiber/epoksi
Boyuna elastisite modülü, E_{11}	40 (GPa)	150.9 (GPa)
Enine elastisite modülü, $E_{22} = E_{33}$	10 (GPa)	11.2 (GPa)
Düzlem içi kayma modülü, $G_{12} = G_{13}$	3.15 (GPa)	5.3 (GPa)
Düzlem dışı kayma modülü, G_{23}	4.32 (GPa)	1.4 (GPa)
Hacim oranı, V_f	0.54	0.54
Poisson oranı, $\mu_{12} = \mu_{13}$	0.3	0.29
Poisson oranı, μ_{23}	0.21	0.33
Yoğunluk	1780 (kg/m ³)	1710 (kg/m ³)
Boyuna çekme mukavemeti, X_T	988 (MPa)	1858.3 (MPa)
Enine çekme mukavemeti, $Y_T = Z_T$	44 (MPa)	25.4 (MPa)
Boyuna basma mukavemeti, X_C	1432 (MPa)	576.8 (MPa)
Enine basma mukavemeti, $Y_C = Z_C$	285 (MPa)	107.3 (MPa)
Düzlem içi kayma mukavemeti $S_{12} = S_{13}$	60.6 (MPa)	79.5 (MPa)
Interlaminar kayma mukavemeti, S_{23}	22 (MPa)	22.9 (MPa)

Kompozit malzemede ki yük taşıma kapasitenin oluşan hasarlar sonucu azalması, oluşturulan bir bozunum (degradation) kuralı ile sonlu elemanlar modeline aktarılmıştır. Bozunum kuralları, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin seçilen kriterlere göre lineer veya lineer olmayacak şekilde azaltılması ile oluşturulmaktadır. Kompozit malzemeler için uyarlanan hasar kriterlerinin değerlendirme sonuçlarına göre malzeme mekanik özellikleri güncellenir ve bu ilgili noktada malzeme davranışını belirler. Her iterasyonda güncelleme gerçekteşir ve malzemenin davranışı sürekli değişir. Çalışmalarda bozunum kurallarının sınırları deneysel şartlara göre doğruluk kazanmıştır. Bu çalışmada bozunum kuralı, iki farklı hasar kriterinin hasar indekslerine göre bir arada uygulanmıştır. Kompozit malzemede ki fiber basma ve çekme hasar kriterine göre malzemenin mekanik özellikleri azaltılarak modele uygulanmıştır. Elastik özelliklerde ki bu azalış, deneysel sonuçlara göre düzenlenmiştir. Kural uygulanırken şu yollar izlenmiştir: Kompozit malzemenin çekme altında yükü fiberin, basma altında ise yükü matris malzemesinin taşıdığı hükmünden yola çıkılarak, fiber çekme hasarına göre malzemenin fiber yönündeki mekanik özellikleri, E_{11} , G_{12} ve ν_{12} , deneysel sonuçlara göre karar verilen indirgeme parametrelerine göre lineer olarak azaltılmıştır. Fiber basma hasarına göre, fiber eksenine dik yöndeki mekanik özellikler, E_{22} , G_{23} ve ν_{23} , lineer olarak azaltılmıştır (şekil 3 b).



Hasar Tipi	Bozunum Kuralı
Fiber çekme hasarı	$E_{11}^d = 0.05E_{11}$
	$G_{12}^d = 0.05G_{12}$
	$\nu_{12}^d = 0.5\nu_{12}$
Fiber basma hasarı	$E_{22}^d = 0.05E_{22}$
	$G_{23}^d = 0.05G_{23}$
	$\nu_{23}^d = 0.5\nu_{23}$

a)

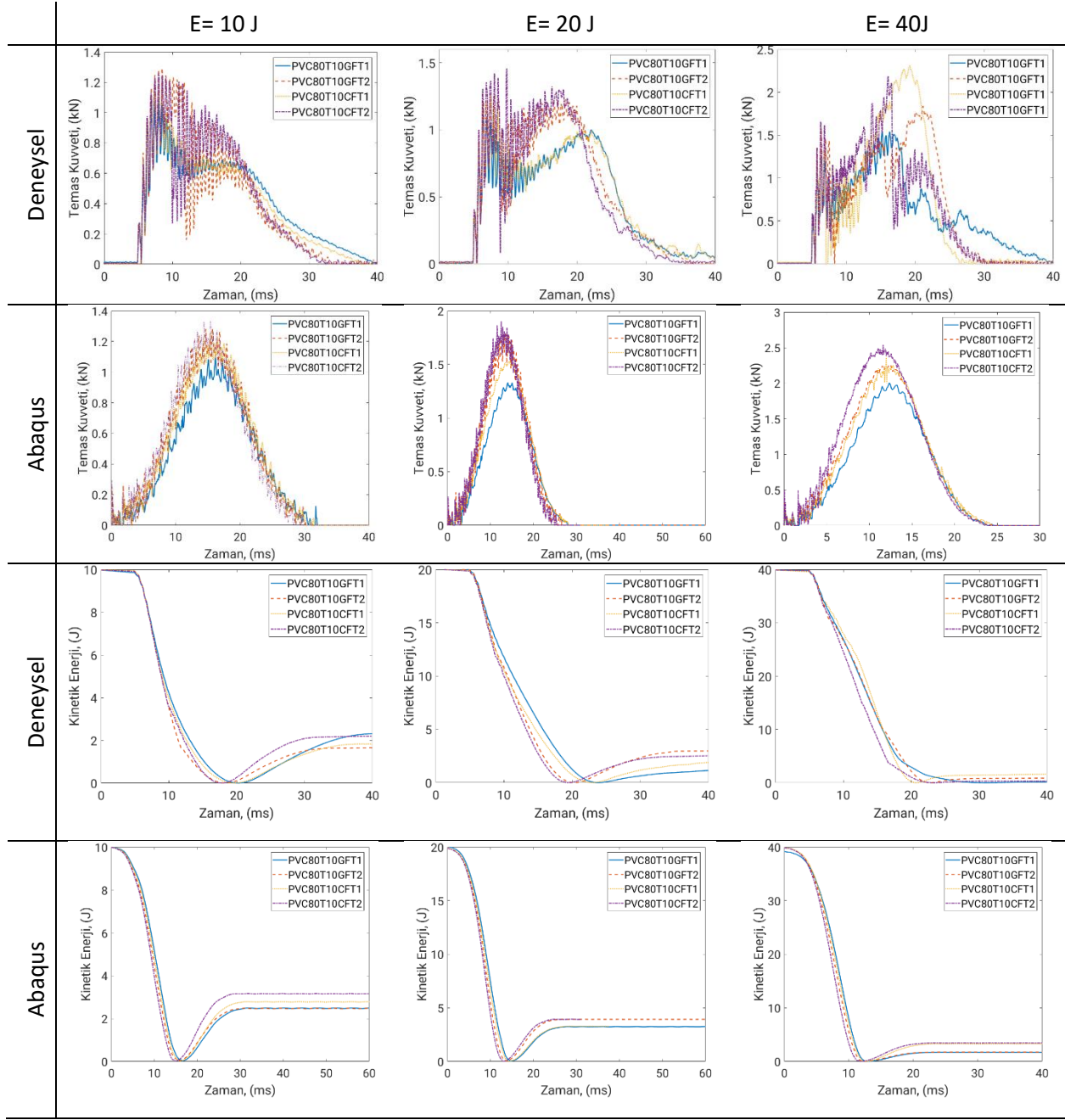
b)

şekil 3. a) Bozunum kuralının sonlu elemanlar modeline uygulanması b) Hasara uğrayan malzeme özellikleri için bozunum kuralı

Kompozit malzeme için tariflenen hasar kriterinde belirtildiği gibi hasar indeksi (SDV) değerleri her bir integrasyon noktası için gerekli parametreler kullanılarak hesaplanır, tüm integrasyon noktalarını içerecek şekilde matris formunda kaydedilir. Her bir hasar tipine göre $[0 - 1]$ arasında hasar düzeyini göstermek üzere hesaplanan bir değer atanır. Malzemenin mekanik özelliklerinin azalışı, artan hasar indekslerine göre değişmektedir. Bunun için lineer bir doğru tariflenmiş (şekil 3 a), bu doğru deneysel sonuçlara göre sonuç vermesi için 10 eşit parçaya bölünmüştür (Ara değerler interpolasyon ile hesaplanır). Malzemenin mekanik özelliklerinin bu doğruya göre yeni değerleri için Python programlama dilinde bir tablo oluşturulmuştur ve ortotropik elastik malzeme modeline aktarılmıştır.

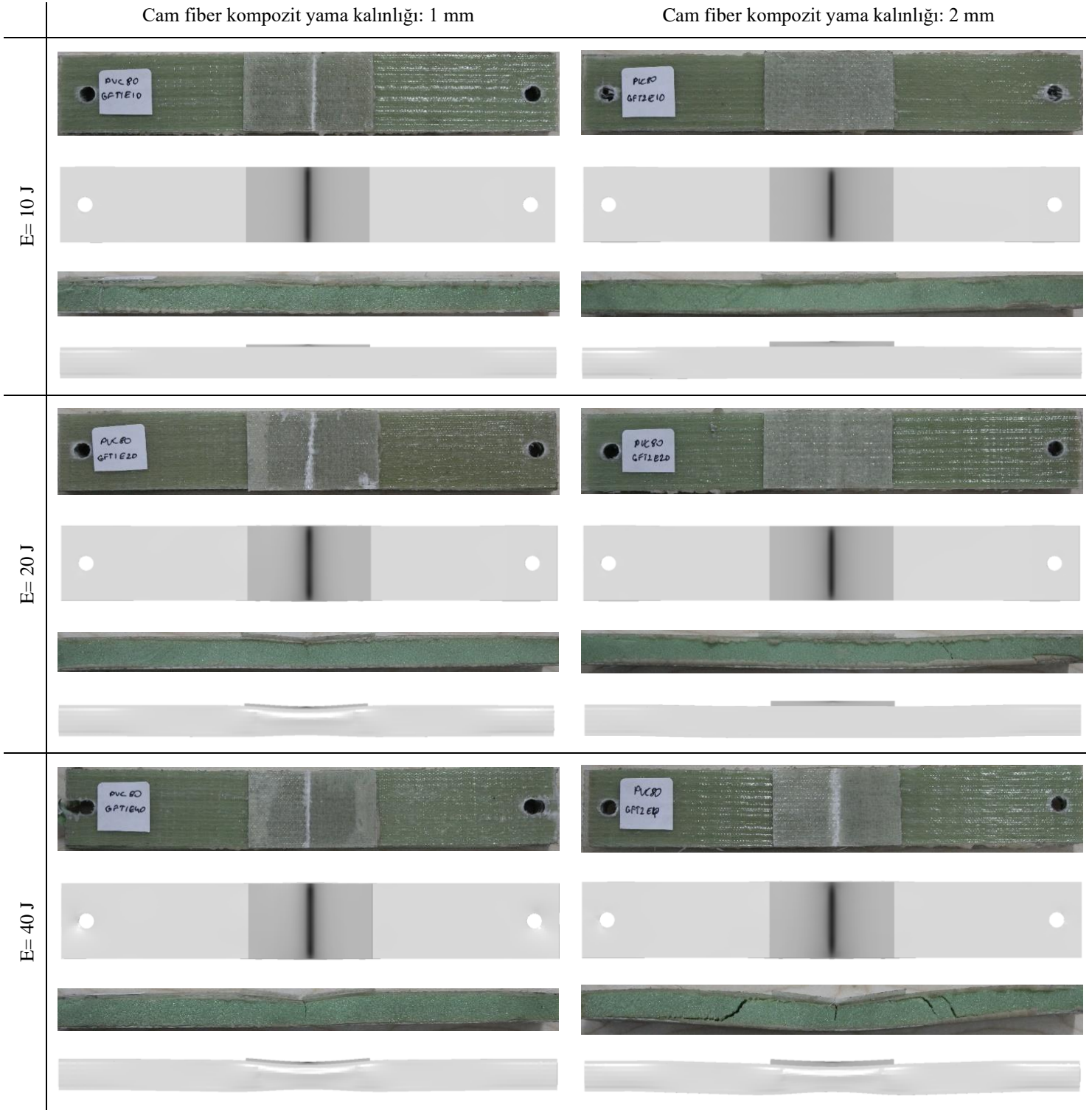
3. Bulgular ve Tartışma

şekil 4'de 1 mm ve 2 mm kalınlıklı cam fiber/epoksi ve karbon fiber/epoksi yamalı sandviç kirişlerin 10, 20 ve 40 J darbe enerjisi altındaki temas kuvvet-zaman ve kinetik enerjisi-zaman grafikleri verilmektedir. 1 mm kalınlıklı cam fiber/epoksi yamalı çentikli sandviçler, en küçük temas kuvvetleri ortaya çıkarmıştır ve temas kuvveti değeri 1 kN değerlerindedir. Temas süreleri ise 40 ms civarındadır. En büyük temas kuvvetleri ise karbon fiber/epoksi yamalı sandviçlerde ortaya çıkmıştır. Darbe enerjisi arttıkça temas kuvvetlerinde de artış olmuştur. Grafiklerde ki dalgalanmalar kompozit malzemelerde meydana gelen hasarlar sonucu oluşmaktadır. En yüksek darbe enerjisinde ise ani düşüşlerden dolayı kirişlerde kırılmalar oluşmuştur. Kinetik enerji grafikleri dikkate alındığında ise kiriş konfigürasyonları arasında enerji sönümlenme kabiliyeti açısından önemli farklar yoktur. Darbe enerjisi arttıkça enerji sönümlenme kabiliyeti artmaktadır. En yüksek darbe enerjisinde ise gelen darbe enerjisinin neredeyse tümü sönümlenmiştir.



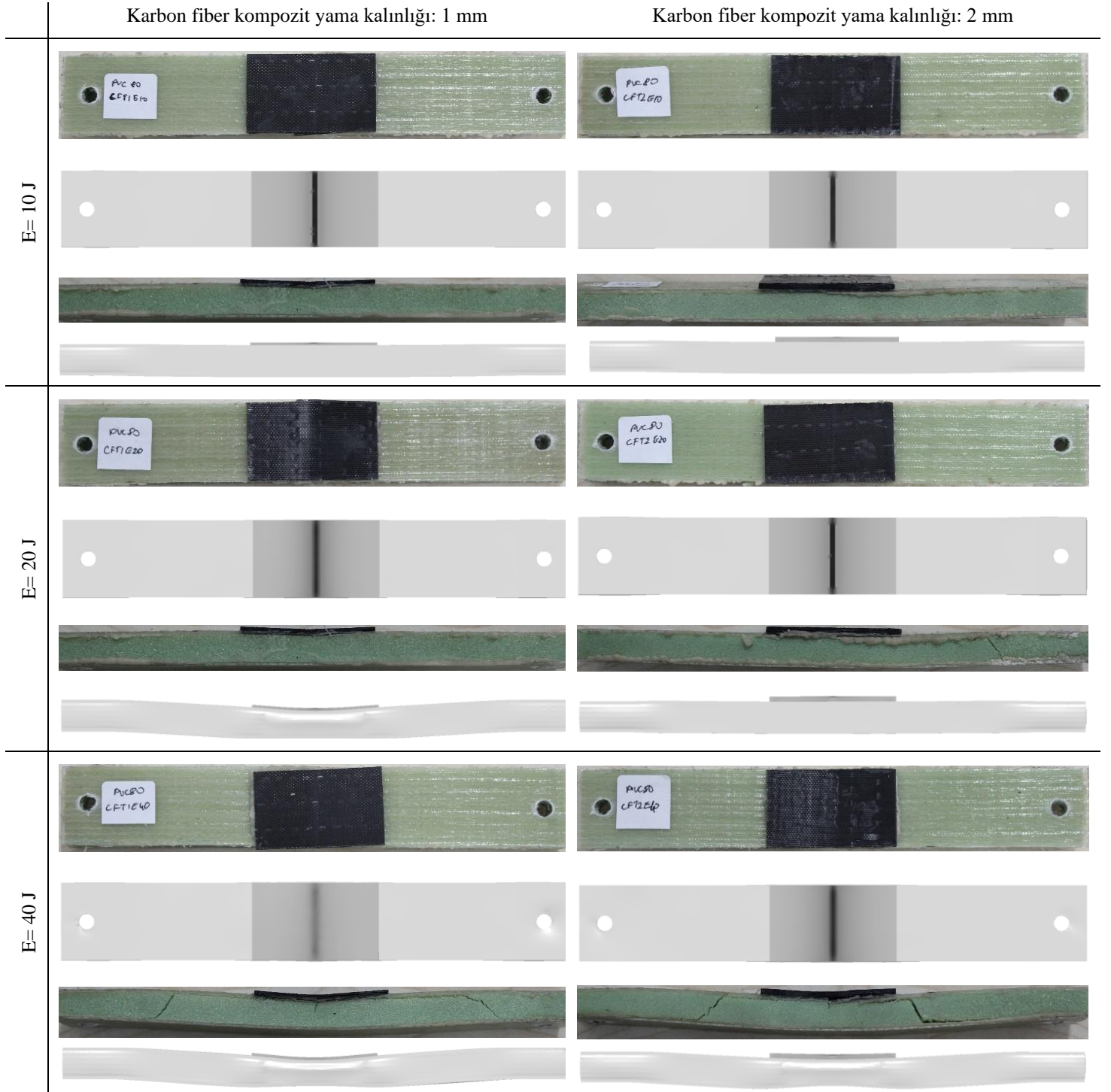
Şekil 4. 1 mm ve 2 mm kalınlıklı cam fiber/epoksi ve karbon fiber/epoksi yamalı sandviç kirişlerin 10, 20 ve 40 J darbe enerjisi altındaki sayısal ve deneysel temas kuvvet-zaman ve kinetik enerjisi-zaman grafikleri

Şekil 5’de 1 ve 2 mm kalınlıklı cam fiber/epoksi yamalı sandviç kirişlerin 10, 20 ve 40 J darbe enerjisi altındaki darbe sonrası deneysel hasar görüntüleri ve sayısal hasar görüntüleri verilmektedir. Şekil 5’de verilen hasar görüntüsü, tüm hasar parametreleri ve tüm tabakaların görüntü işleme ile üst üste getirilmesi ile elde edilmiştir. Yamalı kirişlerin vurucu ile temas eden yüzeylerinde kırılmalar meydana gelmiştir. Darbe enerjisi arttıkça hasarlar artarken, yama kalınlığı arttıkça hasar boyutları azalmaktadır. 40 J darbe enerjilerinde hasarın çekirdek malzemesine geçtiği görülmektedir. Yama kalınlığı 2 mm olduğunda ise yapı daha fazla rijitliği için çekirdek malzemesinde oluşan hasar daha da artmıştır. Sayısal analizlerde ise yama üzerinde oluşan hasar görüntüsü deneysel sonuçlar ile uyum göstermektedir. Sayısal analizlerde köpük malzemesi üzerine yoğunlaşmamış ve hasar modeli geliştirilmemiştir. Bu çalışmanın ilerideki hedefleri açısından önemli bir husustur. Yama kalınlığı 2 mm olduğunda ise sayısal analizlerde de hasar görüntüleri 1 mm yamalı kompozitlere benzerdir. Bu durum yapının rijitliğinin değişmediği anlamına gelmektedir ve köpük malzemesinin sayısal modeli ile ilgili bir durumdur.



Şekil 5. 1 ve 2 mm kalınlıklı cam fiber/epoksi yamalı kompozit sandviç kirişlerin 10, 20 ve 40 J darbe enerjisi altındaki sayısal ve deneysel darbe sonrası hasar görüntüleri

Şekil 5'de 1 ve 2 mm kalınlıklı karbon fiber/epoksi yamalı sandviç kirişlerin 10, 20 ve 40 J darbe enerjisi altındaki darbe sonrası deneysel hasar görüntüleri ve sayısal hasarı görüntüleri verilmektedir. Cam fiber/epoksi yamalarda görülen hasarlar, karbon fiber/epoksi yamalarda da ortaya çıkmıştır. Ancak hasar alanları karbon fiber renginden dolayı tam olarak görülmesi de çekirdek köpüklerde oluşan hasar bu durumu açıklamaktadır. Sayısal analizlerde ise bu durum açıkça gözükmemektedir. Yama kalınlığının artışı ile sandviç kirişler daha da rijitleşmiş ve çekirdek malzemede oluşan hasar artmıştır. Karbon fiber cam fibere göre daha elastik olduğu için kiriş daha fazla eğilmeye maruz kalmış ve köpük malzemesinde hasar artmıştır.



Şekil 6. 1 ve 2 mm kalınlıklı karbon fiber/epoksi yamalı kompozit sandviç kirişlerin 10, 20 ve 40 J darbe enerjisi altındaki darbe sonrası sayısal ve deneysel hasar görüntüleri

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, farklı yama malzemesi ve kalınlıktaki kompozit yama ile tamir edilen kompozit sandviç kirişlerin düşük hızlı darbe davranışı araştırılmıştır. Temas kuvveti ve kinetik enerji geçmişleri ve çarpma sonrası hasar alanları ve bölgeleri üç farklı darbe enerjisi seviyesi altında incelenmiştir. Kompozit yamalar ve yüzey plakaları vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiştir. Yamalar ve sandviç kirişler, iki fazlı bir endüstriyel yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmıştır. Sonlu eleman analizinde, fiber takviyeli kompozit yamalar ve yüzey plakaları üç boyutlu katı elemanlar ve ortotropik malzeme davranışı ile modellenmiştir. Ayrıca, üç boyutlu hasar kriterleri, hazırlanan kullanıcı tanımlı malzeme modeli (VUMAT) ve tariflenen bir bozunum kuralı ile modellenmiştir. FORTRAN dilindeki alt yordam ABAQUS yazılımına uyarlanmıştır. Kompozit malzemenin yük kapasitesindeki azalma elastik bozulma modeli ile sayısal

modele aktarılmıştır. Yapışkan katman için kohezif bölge modeli kullanılmıştır. Önerilen sayısal model, deneysel sonuçlarla başarılı bir şekilde uyum göstermiştir.

Artan darbe enerjisi ile maksimum temas kuvveti seviyelerinde artış olmuştur. Yama malzemesi değişikçe, maksimum temas kuvveti seviyelerinde aşırı bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Bununla birlikte, yamanın kalınlığı arttıkça, maksimum temas kuvvetleri artmıştır. Kompozit malzemelerdeki hasar özellikle fiber kırılmaları olarak meydana geldiğinden en yüksek darbe enerjisi seviyeleri için temas kuvveti eğrilerinde ani düşüşler meydana gelmiştir. Yama kullanımının, temas kuvveti davranışı açısından çarpma davranışını aşırı derecede değiştirmemesi, ancak hasar alanları üzerinde azaltıcı bir etkiye sahip olması arzu edilir. Çarpma simülasyonları sırasında yük transferini yamadan sandviç kirişe aktaran, kohezif eleman modelinin başarısıdır.

Teşekkür / Bilgilendirme

Yazarlar, 216M519 Nolu Proje Kapsamında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) Teşekkür Eder.




Referanslar

- Abaqus/Explicit (version 6.14), User's manual, finite element software. available from <http://www.simulia.com>.
- Albedah, A., Khan, S.M.A., Benyahia, F. & Bouiadjra, B.B. (2016). Effect of load amplitude change on the fatigue life of cracked Al plate repaired with composite patch, *International Journal of Fatigue*, 88, 1-9.
- Balaganesan, G. & Khan, V.C. (2016). Energy absorption of repaired composite laminates subjected to impact loading, *Composites Part B*, 98, 39-48.
- Benyahia, F., Aminallah, L., Albedah, A., Bouiadjra, B.B. & Achour, T. (2015). Experimental and numerical analysis of bonded composite patch repair in aluminum alloy 7075 T6, *Materials and Design*, 73, 67-73.
- Carneiro, M.A.S. & Campilho, R.D.S.G. (2017). Analysis of adhesively-bonded T-joints by experimentation and cohesive zone models, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 31, 1998–2014.
- Cheng, P., Gong, X.J., Aivazzadeh, S. & Xiao, X. (2014). Experimental observation of tensile behavior of patch repaired composites, *Polymer Testing*, 34, 146-154.
- Constantin, N., Sandu, M., & Sorohan, S. (2013). Restoration of the mechanical performance of damaged Al panels using bonded composite repair patches, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 42, 69-76.
- Errouane, H., Sereir, Z., & Chateaneuf, A. (2014). Numerical model for optimal design of composite patch repair of cracked aluminum plates under tension, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 49, 64-72.
- Hashin, Z. (1980). Failure criteria for unidirectional fiber composites. *Journal of Applied Mechanics*, 47(2), 329–334.
- Khalili, S.M.R., Ghadjar, R., Sadeghinia, M. & Mittal, R.K. (2009). An experimental study on the Charpy impact response of cracked aluminum plates repaired with GFRP or CFRP composite patches, *Composite Structures*, 89, 270-274.
- Kwon, Y.W. & Hall, B.L. (2015). Analyses of cracks in thick stiffened plates repaired with single-sided composite patch, *Composite Structures*, 119, 727-737.
- Mall, S. & Conley, D.S. (2009). Modeling and validation of composite patch repair to cracked thick and thin metallic panels, *Composites: Part A*, 40, 1331-1339.
- Sabelkin, V., Mall, S., Hansen, M.A., Vandawaker, R.M. & Derriso, M. (2007). Investigation into cracked aluminum plate repaired with bonded composite patch, *Composite Structures*, 79, 55-66.
- Shams, S.S. & El-Hajjar, R.F. (2013). Overlay patch repair of scratch damage in carbon fiber/epoxy laminated composites, *Composites: Part A*, 49, 148-156.
- Singh, H., Namala, K. K. & Mahajan, P. (2015). A damage evolution study of E-glass/epoxy composite under low velocity impact, *Composites Part B*, 76, 235-248.
- Zhou, J., Hassan, M.Z., Guan, Z. & Cantwell, W.J. (2012). The low velocity impact response of foam-based sandwich panels, *Composites Science and Technology*, 72(14), 1781 – 1790.



Medikal İşletmesi İçin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Bakım Stratejisi Seçimi

Maintenance Strategy Selection with Multi Criteria Decision Making Methods for Medical Company

Rabia Akgönül¹ , Evren Can Özcan¹ , Tamer Eren¹ 

¹ Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 71451, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 21/01/2021 **Kabul / Accepted:** 23/03/2021 **Çevrimiçi Basım / Published Online:** 23/03/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Her geçen gün rekabetin arttığı üretim sektöründe, işletmeler üretimdeki sürekliliği sağlamayı ve verimliliği arttırmayı amaçlamaktadır. Üretimde sürekliliğin sağlanması ve verimliliğin artırılması makine/ ekipmanlar için doğru bakım faaliyetlerinin uygulanması ile mümkündür. Doğru bakım faaliyetlerinin planlı bir şekilde yapılması için en uygun bakım stratejisinin seçilmesi ciddi önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Covid-19 küresel salgınında önemi artan solunum cihazları için hortum devreleri üreten bir medikal işletmesinin sürekliliğini ve verimliliğinin sağlanması amaçlanmıştır. Bu sebeple üretim hattının en kritik elemanı olan hortum çekme makinesi için Bulanık ANP, TOPSIS ve ELECTRE yöntemleri kullanılarak en uygun bakım stratejisinin seçilmesi problemi ele alınmıştır. Hortum çekme makinesi için en uygun bakım stratejisini seçmek için beş ana kriter (güvenlik, katmadeğer, maliyet, uygunluk ve teknik), on dört alt kriter ve dört alternatif (düzeltici, periyodik, duruma dayalı ve revizyon bakım) belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve en uygun bakım stratejisinin seçimi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Bakım Strateji Seçimi, Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri, Covid-19, Solunum Cihazları”

Abstract

In the production sector, where competition is increasing day by day, companies aim to ensure continuity in production and increase efficiency. Ensuring continuity in production and increasing productivity is possible with the implementation of correct maintenance activities for machinery / equipment. Choosing the most appropriate maintenance strategy is of great importance in order to carry out the correct maintenance activities in a planned manner. In this study, it is aimed to ensure the continuity and increase the efficiency of a medical company that produces hose circuits for respiratory devices, whose importance has increased in the Covid 19 global epidemic. For this reason, the problem of choosing the most appropriate maintenance strategy for the hose pulling machine, which is the most critical element of the production line, by using Fuzzy ANP, TOPSIS and ELECTRE methods is discussed. Five main criteria (safety, value added, cost, suitability and technique), fourteen sub-criteria and four alternatives (corrective, periodic, condition-based and revision maintenance) have been determined to select the most appropriate maintenance strategy for the hose pulling machine. The results obtained were compared and the most appropriate maintenance strategy was selected.

Key Words

“Maintenance Strategy Selection, Multi-Criteria Decision Making Methods, Covid-19, Respiratory Devices”

1. Giriş

Bakım, şirketlerin kârlılığının istenen seviyenin üzerinde tutabilmesi ve üretimdeki sürekliliğin sağlayabilmesi amacıyla, makine ve ekipmanların beklenen performans seviyesini devam ettirebilmesi için ekonomik ömür boyunca yürütülen teknik, idari ve yönetsel faaliyetlerin bütününe denir. Bakım faaliyetlerinin temel amacı, tüm makine ve ekipmanların etkili ve verimli bir şekilde kullanılmasını amacıyla oluşacak herhangi bir arızayı en kısa sürede gidermek ve beklenmeyen arızaları önlemektir. (Çamkoru ve Sayın, 2011)

Dünyada yaşanan olaylar ve gelişen teknoloji sonucunda değişen piyasa koşulları işletmeler arasında rekabeti arttırmaktadır. Bu rekabet ortamında özellikle üretim yapan işletmelerde sistemlerin küçük ya da büyük olması fark etmeksizin herhangi bir makine veya ekipmanlarda oluşacak ani ve beklenmedik arızalar planlanan üretim zamanının geç tamamlanması, istenilen ürün kalitesinin elde edilememesi ve üretimin durması gibi problemlerle üretim sistemini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu da üretim tesisleri için ek bir maliyet anlamına gelmektedir. Bu sebeple işletmeler bakımı üretimin temel proseslerinden biri haline getirerek üretimde sürekliliğin sağlanmasını, verimliliğin artırılmasını ve ek maliyetlerin engellenmesini sağlamaktadır. Bakımın planlı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için her işletme kendine uygun bir bakım stratejisi belirlemelidir.

En uygun bakım stratejisinin belirlenmesi, sayıca fazla olan çok sayıda kriter ve alternatifin yanı sıra karmaşık parametreleri içerisinde barındırmasından dolayı bir çok kriterli karar verme problemidir. Çok kriterli karar verme için kullanılan yöntemler, sayıca fazla olan ve birbirlerinden farklı faktörlerin etkisini dikkate alarak en uygun seçeneği belirlemede karar vericiye yardım sağlar. İşletmeler, çok sayıda kriter ve alt kriter ile bu kriterlerin birbirleri arasındaki ilişkileri ve alternatiflerle olan ilişkileri dikkate alarak uygun yöntemlerle uygun bakım stratejilerini belirleyebilmektedir. (Cayir Ervural, vd. 2018)

Bu çalışma, Dünya'yı etkisi altına alan Covid-19 salgınında önemi her geçen gün artan ve yerli üretimi de olan solunum cihazlarının hortum devrelerini üreten bir medikal işletmesinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın temel amacı; işletmenin üretim hattındaki ani durmaların önlenmesi, verimliliğin artırılması ve üretimin sürekliliğinin sağlanmasıdır. Bu nedenle üretim hattının en kritik elemanı olan hortum çekme makinesi için bir bakım strateji seçimi problemi ele alınmıştır. Bulanık koşullar altında yapılan çalışmanın çözümünde Bulanık ANP, TOPSIS ve ELECTRE yöntemleri kullanılarak tutarlı ve gerçeğe uygun sonuçların elde edilmesiyle literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir

Çalışmanın ikinci bölümünde literatür araştırmasına yer verilmiş, üçüncü bölümde en uygun bakım strateji seçimi için kullanılan yöntemlere detaylı olarak yer verilmiş, dördüncü bölümde ana ve alt kriterler açıklanmış, beşinci bölümde uygulamanın detaylarına yer verilmiş, altıncı bölümde sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

2. Literatür Araştırması

Bakım faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi için ilk yapılması gereken uygun bakım stratejisinin seçilmesidir. Literatüre bakıldığında üretim, petrol, madencilik gibi bir çok sektörde farklı yöntemler kullanılarak yapılan bakım strateji seçimi ve bakım planlama çalışmaları bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları şunlardır;

Sianturi vd. (1996) çalışmada; bir iplik fabrikası için kestirimci, periyodik ve düzeltici bakım olmak üzere üç uygulanabilir bakım alternatifi arasından en iyi bakım stratejisini seçmek için Bulanık AHP yöntemini kullanmıştır. Bevilacqua ve Braglia (2000), bir İtalyan petrol şirketinde en uygun bakım stratejisi seçimi yapılmıştır. Belirlenen 5 alternatif bakım yöntemini seçmek için makineler kritiklik analizine tabi tutulduktan sonra Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi kullanılarak en iyi bakım stratejisi seçilmiştir. Wang vd. (2007), çalışmada, bir elektrik santralinde farklı ekipmanlar için periyodik, düzeltici, kestirimci ve duruma dayalı bakım stratejileri arasından en iyi bakım stratejisi bulanık AHP yöntemi ile seçilmiştir. Zaeri vd. (2007) çalışmada; torna, freze, pres ve CNC makinelerinin bulunduğu bir imalat fabrikasında periyodik, düzeltici, kestirimci, duruma dayalı ve fırsatçı bakım yöntemleri arasından AHP yöntemini kullanılarak en uygun bakım stratejisi seçilmiştir. Jafari vd. (2008) tarafından ele alınan çalışmada, düzeltici bakım, periyodik bakım ve duruma dayalı bakım stratejileri arasından en uygun bakım stratejisi seçimi için bulanık Delphi yöntemi ile SAW yöntemi birleştirilmiştir. Ilankumaran ve Kumanan (2009) tekstil endüstrisindeki çalışmada periyodik bakım, güvenilirlik merkezli bakım, duruma dayalı bakım ve kestirimci bakım stratejileri arasından en uygun bakım stratejisini seçmek için kriterlerin ağırlıklarını hesaplamada AHP, alternatifleri sıralamada VIKOR yöntemini kullanmışlardır. Önerilen yöntemin kabul edilebilir olduğundan emin olmak için TOPSIS yöntemini de uygulamışlardır. Görener (2013) bir imalat tesisi için yaptığı çalışmada, en uygun bakım stratejisini seçebilmek için emniyet, katma değer, maliyet, uygulanabilirlik ve diğer kriteri olmak üzere beş değerlendirme kriteri ve dört bakım alternatifi göz önüne alınmıştır. Çalışmada, en uygun alternatif bakım stratejisini seçmek için Bulanık-WSA ve TOPSIS yöntemleri kullanılmıştır. Odeyale vd. (2013) imalat endüstrisinde düzeltici bakım, periyodik bakım ve kestirimci bakım olmak üzere üç alternatif arasından en uygun bakım stratejisi seçimini AHP yöntemini kullanarak yapmıştır. Özcan ve Eren (2014) bir doğalgaz çevrim santralinde enerji verimliliği üzerinde pozitif etkiye sahip olan bakım planlaması gerçekleştirmiştir. Santraldeki ekipmanların 9 kriter altında TOPSIS yöntemi ile kritiklik seviyeleri hesaplanmış ve 9 yıllık iş gücü ile bakım planı elde edilmiştir. Shafiee (2015) çalışmada, karmaşık bir sistem için ANP yöntemini kullanmıştır. Joshua vd. (2016) çalışmada, bir döküm endüstrisinde üretim verimliliğini artırmak için uygun bakım stratejisi ANP yöntemi ile seçilmiştir. Özcan vd. (2017) çalışmada, hidroelektrik santrallerinde bakım stratejisi seçim problemine odaklanmıştır. Hidroelektrik santrallerindeki binlerce ekipman arasından benzer etkilere sahip dokuz ekipman ve santral için en kritik ekipmanlar, TOPSIS ile

ağırlıklandırılan dokuz değerlendirme kriteri ile belirlenmiştir. Sonra AHP ile hesaplanan kriter ağırlıkları ve alternatif öncelikleri kullanılarak santralin gerçeklerini yansıtan hedef programlama modeli aracılığıyla seçilen her ekipman için bakım strateji kombinasyonları elde edilmiştir. Panchal vd. (2017) en uygun bakım stratejisinin seçimini Hindistan'daki bir gübre endüstrisi tesisinde yapmıştır. Duruma dayalı, kestirimci, periyodik, düzeltici ve güvenilirlik merkezli bakım alternatifleri arasından en uygun alternatifi seçmek için bulanık AHP ve bulanık CODAS yöntemleri birleştirilmiştir. Seiti vd. (2017), çelik haddeleme şirketi için AHP'ye dayanan risk temelli bir model geliştirilerek düzeltici, kestirimci, duruma dayalı, periyodik ve toplam üretken bakımdan oluşan 5 alternatif arasından uygun bir bakım stratejisi seçimi yapılmıştır. Hemmati vd. (2018) bir asit üretim tesisinde maliyet, risk ve katma değer etkisinin yanı sıra, bir asit imalat şirketinin farklı ekipmanlara uygun bakım stratejisi seçmek için uygulanabilir bir model oluşturulması amaçlamıştır. Çalışmada alternatifler olarak düzeltici, kapama, duruma dayalı ve periyodik bakım ele alınmıştır. Tesis için en uygun bakım stratejisini seçmek için bulanık ANP yöntemi kullanılmıştır. Yumuşak vd. (2018), bir hidroelektrik santrali için düzeltici bakım, periyodik bakım, kestirimci bakım ve revizyon bakım stratejileri arasından en uygun bakım stratejisinin seçilmesi amaçlanmıştır. Yedi elektriksel ekipman grubu üzerinde yapılan çalışmada hibrit bir AHP, TOPSIS ve Tam Sayılı Programlama metodolojisi kullanılmış ve her ekipman için farklı bir bakım stratejisi seçilmiştir. Kundakçı (2019) çalışmada bir imalat işletmesi için en iyi bakım strateji seçimi problemini ele almıştır. Bu problem, alternatifleri ve kriterleri belirli ifadelerle değerlendirmede belirsizlikler ve güçlükler içerdiğinden bulanık MOORA yöntemi kullanılmıştır. Kurian vd. (2019) çalışmada, Hindistan'daki bir çimento fabrikası için optimum bakım stratejisinin seçimini ANP yöntemi ile yapmıştır. Özcan vd. (2019), Türkiye'deki büyük hidroelektrik santrallerinden birinde 1330 elektriksel ekipman arasından en kritik ana ekipman grubu AHP-TOPSIS kombinasyonu ile belirledikten sonra bu ekipman grubu için önerilen tam sayılı programlama modeli ile en uygun bakım strateji kombinasyonu belirlenmiştir. Özcan vd. (2019) bir hidroelektrik santralinde bir bakım planlama çalışması yapmıştır. İlk olarak AHP-TOPSIS kombinasyonunu kullanarak santraldeki binlerce ekipmanın risk seviyeleri belirlenmiştir. Sonrasında periyodik ve revizyon bakım stratejileri için bütün ekipmanların departman tabanlı bakım planları yapılmıştır. Bu çalışma kullanılan yöntemlerin kombinasyonu ile literatürde bir ilk olmuştur. Özcan vd. (2020) bir hidroelektrik santrali için daha önceden yaptıkları çalışma yaptığı bakım strateji çalışması sonucu elde ettiği periyodik bakımın çizelgelemesi için 7 ana ekipman grubu belirlemiştir. Yapay sinir ağları kullanılarak santralin bir yıllık elektrik üretim tahmini yapılmıştır ve sonrasında 0-1 tam sayılı programlama kullanılarak beş farklı periyodik bakım türünün çizelgelemesi yapılmıştır. Özcan vd. (2020), 2018 yılı sonunda Türkiye'nin enerji talebinin beşte birlik kısmının karşılayan bir hidroelektrik santrali için bakım planlaması sorununu ele almıştır. İlk olarak kriterler belirlenerek kritiklik seviyeleri AHP yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır. Elde edilen ağırlıklar TOPSIS yönteminde kullanılarak en yüksek kritiklik düzeyine sahip 14 ekipman sıralanmıştır. YSA kullanılarak iki arıza arasındaki tahmini süre modellenmiş bir bakım planı oluşturulmuştur. Genç vd. (2021) çalışmada, Ankara Metro'su'nun önceki yıllara ait bakım verilerini incelemiş ve Yapay Sinir Ağı modelini kullanarak her ekipmanın türüne göre arızayı etkileyen faktörler tespit etmiştir. Sonrasında ekipman arıza sıklığına göre 10 haftalık bir bakım planlaması yapılmıştır. Çalışma sonucunda trenlerin ortalama arıza süresi %27 azalırken, kesintisiz hizmet süresi %40 oranında artış göstermiştir. Özcan vd. (2021) Türkiye'deki önemli hidroelektrik santrallerinden birinde etkin bir bakım yönetimi yapmak amacıyla öncelikle binlerce ekipman arasındaki en kritik grup AHP-TOPSIS kombinasyonu ile belirlenmiştir. Daha sonra seçilen grup için önleyici, düzeltici, kestirimci ve revizyon bakım stratejileri arasından en uygun olanı literatürde az kullanılan PROMETHEE yöntemiyle belirlenerek %100 iyileştirme sağlanmıştır.

Literatüre genel olarak bakıldığında; üretim sektöründe tek makine için çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak yapılan bakım stratejisi seçimi çalışmaları bulunmaktadır. Ancak tıbbi ürünler üreten bir işletmede yapılan bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmanın solunum cihazlarının hortum devrelerini üreten bir işletmede yapılmış olması diğer çalışmalardan farkını ortaya koymaktadır. Ayrıca çalışmalarda farklı çok kriterli karar verme yöntemlerinin kombinasyonları kullanılmasına rağmen Bulanık ANP, TOPSIS ve ELECTRE yöntemlerinin bir arada kullanıldığı bir çalışma bulunmadığı için bu çalışma bir ilk olmuştur.

3. Kullanılan Yöntemler

Literatüre bakıldığında; bakım strateji seçimi çalışmalarında çoğunlukla kriter ağırlıklarının belirlenmesinde AHP yöntemi, alternatiflerin sıralanmasında ise TOPSIS ve ELECTRE yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada ise problemin yapısında birbiriyle ilgili ana ve alt kriterlerin değerlendirilmesinde karar vericilerin dilsel ifadelerindeki belirsizliklerin daha anlaşılır hale getirilmesine olanak veren ve bu kriterler arasındaki karmaşık etkileşimlerin bir ağ yapısıyla kolaylıkla değerlendirilmesi için Bulanık ANP yöntemi kullanılmıştır. Bulanık ANP yönteminin kullanılması klasik ANP'ye göre daha etkili ve gerçek hayatla daha tutarlı sonuçların elde edilmesini sağlar.

Bulanık ANP'den elde edilen sonucun kabuledilebilir olduğundan emin olmak için TOPSIS ve ELECTRE yöntemleri de uygulanarak sıralaması yapılmıştır. TOPSIS ve ELECTRE yöntemleri ilk sıradaki alternatifin seçilmesine ve diğer alternatiflerin de sıralanmasına olanak sağlayan, etkinlik seviyeleri yüksek olan sıralama algoritmalarıdır. Literatürde farklı karar problemlerinde karar etkinliği temelinde sağladıkları, tutarlı sonuçları sunma, uygulama kolaylığı, nitel ve nicel değer yargılarını yansıtabilme ve farklı ağırlıklara sahip değerlendirme kriterlerini işleyişlerine yansıtma gibi avantajlardan dolayı sıklıkla kullanılmaları (Velasquez ve Hester,2013) bu yöntemler seçilmiştir.

3.1. Bulanık ANP

Bulanık ANP'nin çözümünde Chang'ın (Chang, 1996) önermiş olduğu *Genişletilmiş Analiz Yöntemi Algoritması* kullanılır. Bu yöntemde göre, $X=\{x_1,x_2,\dots,x_n\}$ nesne seti ve $G=\{g_1,g_2,\dots,g_m\}$ amaç seti olarak tanımlanmaktadır. Yöntem, her bir nesneyi ele

olarak g_i değerleri oluşturmakta ve her bir nesne için m genişletilmiş analiz değerleri, $M_{gi}^1, M_{gi}^2, \dots, M_{gi}^m, i=1,2,\dots,n$ şeklindedir. M_{gi}^j ($j=1,2,\dots,m$) değerleri üçgen bulanık sayıları ifade etmektedir. Yöntemi 4 adımdan oluşur ve bu adımlar sırasıyla açıklanmıştır:

Adım 1: i . nesneye göre bulanık genişleme değeri eşitlik (1) gibi hesaplanmaktadır.

$$S_i = \sum_j^m M_{gi}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} \quad (1)$$

$$\sum_j^m M_{gi}^j = \left(\sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j \right) \quad (2)$$

ve elde etmek için M_{gi}^j ($j=1,2,\dots,m$) değerleri üzerinde bulanık işlemler yapılır.

$$\sum_{i=1}^n \sum_j^m M_{gi}^j = \left(\sum_{i=1}^n l_i, \sum_{i=1}^n m_i, \sum_{i=1}^n u_i \right) \quad (3)$$

Yukarıdaki işlemlerden sonra eşitlik (3)'teki vektörün tersi (4)'teki eşitlik ile hesaplanır.

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_j^m M_{gi}^j \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i} \right) \quad (4)$$

Adım 2: $M_2=(l_2, m_2, u_2) \geq M_1=(l_1, m_1, u_1)$ olasılık derecesinin hesaplanması $(M_2 \geq M_1) = \sup[\min(\mu_{M_1}(x), \mu_{M_2}(y))]$ veya eşdeğeri kabul edilen (5) ile yapılır.

$$V(M_2 \geq M_1) = hgt(M_2 \cap M_1) = \mu_{M_2}(d) = \begin{cases} 1, & \text{eğer } m_2 \geq m_1 \\ 0, & \text{eğer } l_1 \geq u_2 \\ \frac{(l_1 - u_2)}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)}, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (5)$$

d, μ_{M_1} ve μ_{M_2} arasında yer alan en yüksek kesişimin ordinatıdır. M_1 ve M_2 'yi karşılaştırmak için, $V(M_1 \geq M_2)$ ve $V(M_2 \geq M_1)$ değerleri gereklidir.

Adım 3: M_i ($i=1,2,\dots,k$) k konveks bulanık sayılardan daha büyük konveks bir bulanık sayının olabilmesi için olasılık derecesi şu şekilde tanımlanmaktadır.

$$(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) = V[(M \geq M_1) \text{ ve } (M \geq M_2) \text{ ve } \dots \text{ ve } (M \geq M_k)] = \min(M \geq M_i) \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (6)$$

$$d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k) \quad (7)$$

Varsayıldığında $k=1,2,\dots,n$; $k \neq i$ için, ağırlık vektörü şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T \quad (8)$$

Burada, A_i ($i=1,2,\dots,n$) n tane elemandan oluşmaktadır.

Adım 4: Normalize edilmiş ağırlık vektörü eşitlik (9) kullanılarak tanımlanmaktadır:

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \quad (9)$$

Bulunan W değeri bulanık bir sayı değil nümerik bir sayıdır.

3.2. TOPSIS

Çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan TOPSIS yöntemi, nümerik verilerin kullanıldığı ve uygulanması sonucunda gerçekçi sonuçlar veren bir yöntemdir. 1981 yılında Hwang ve Yoon tarafından geliştirilmiş bir yöntemdir. TOPSIS yöntemi ile alternatifler arası sıralama yapılmaktadır. Sıralama, seçilecek olan alternatifin ideal çözüme olan en yakın mesafesi ve negatif ideal çözüme olan en uzak mesafesinin belirlenmesi ile gerçekleştirilmektedir (Özcan vd. , 2017). TOPSIS yöntemini oluşturan 7 adım aşağıda açıklanmıştır;

Adım 1. Karar matrisinin oluşturulması: Üstünlüklerinin sıralanması için alternatifler karar matrisinin satırında yer alırken, en uygun alternatife karar vermede etkili olan kriterler sütünlarda yer almaktadır.

Adım 2. Standart karar matrisinin oluşturulması: Karar matrisinin elemanlarının kullanılması ve aşağıda verilen eşitlik (10) yardımıyla oluşturulur.

$$R_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m a_{kj}^2}} \quad (10)$$

Adım 3. Ağırlıklı standart karar matrisinin oluşturulması: Kriterler, standart karar matrisinin elemanları kriterlerin önem derecesine göre ağırlıklandırılır. Bütün ağırlıkların kümülatif toplamı 1'e eşit olmalıdır. Standart karar matrisinin sütunlarındaki her bir değer bulunan kriter ağırlıkları ile çarpılmasıyla ağırlıklı standart karar matrisi elde edilir.

Adım 4. İdeal (A) çözümün ve negatif ideal (A-) çözümün oluşturulması:* Ağırlıklı standart karar matrisinin her sütunu için en büyük değer seçilerek ideal (A*) çözüm seti, en küçük değer seçilerek negatif ideal (A-) çözüm seti bulunur.

Adım 5. Ayırım ölçütlerinin (S_i^{} ve S_i⁻) hesaplanması:* Aşağıda verilen eşitlikler yardımıyla ağırlıklı standart karar matrisindeki her bir karar noktasının değerlendirme faktörünün ideal çözüm ve negatif ideal çözüm setinden sapma miktarları hesaplanır.

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad (11)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (12)$$

Adım 6. İdeal çözüme göreli yakınlığın (C_i^{}) hesaplanması:* Hesaplanan ayırım ölçütlerinin kullanılmasıyla ideal çözüme göreli yakınlık eşitlik (13) yardımıyla hesaplanır. C_i^{*} değeri 0 ile 1 arasından bir değer almalıdır.

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*} \quad (13)$$

3.3. ELECTRE

ELECTRE yöntemi, ilk kez 1966 yılında Benayoun tarafından; çeşitli alternatifler için belirlenen kriterlere göre uyum veya uyumsuzlukların her bir kriter için belirlenmiş eşik değerleri kullanılarak değerlendirme yapılan bir yöntem olarak ortaya konulmuştur. Daha sonraki çalışmalarda eksikliklere göre alternatifler arasında seçimin yapılmasında, alternatiflerin sıralanmasında veya alternatiflerin gruplanmasında yardımcı olan ELECTRE II, III, IV, TRI gibi farklı türleri geliştirilmiştir. Alternatiflerin sıralanmasını ve seçiminin yapılması açısından kolaylık sağladığından her sektörde tercih edilen bir yöntemdir (Tunca vd. 2015).

Adım 1. Karar matrisinin oluşturulması : Üstünlüklerinin sıralanması için alternatifler karar matrisinin satırında yer alırken, en uygun alternatife karar vermede etkili olan kriterler sütünlarda yer almaktadır.

Adım 2. :Standart karar matrisinin oluşturulması: Karar matrisinin elemanları kullanılarak problemde hesaplanmak istenen maliyetkriteri ya da fayda kriteri için aşağıda verilen eşitlikler kullanılır.

$$X_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m (a_{kj})^2}} \quad (14)$$

$$X_{ij} = \frac{\frac{1}{a_{ij}}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m \left(\frac{1}{a_{kj}}\right)^2}} \quad (15)$$

Adım 3. Ağırlıklı standart karar matrisinin oluşturulması: Kriterler, standart karar matrisinin elemanları kriterlerin önem derecesine göre ağırlıklandırılır. Bütün ağırlıkların kümülatif toplamı 1'e eşit olmalıdır. Standart karar matrisinin sütunlarındaki her bir değer bulunan kriter ağırlıkları ile çarpılmasıyla ağırlıklı standart karar matrisi elde edilir.

Adım 4. Uyum ve uyumsuzluk indekslerinin belirlenmesi: Ağırlıklı standart karar matrisi kullanılarak belirlenen uyum indekslerinin her alternatif için ikili kıyaslamalarda kullanılabilmesi amacıyla kriterler iki ayrı küme şeklinde ayrılır. A_p ve A_q ($1, 2, \dots, m$ ve $p \neq q$) uyum kümesinde A_p, A_q 'ya tercih edilir.

$$C_{(p,q)} = \{j | V_{pj} \geq V_{qj}\} \quad (16)$$

A_p, A_q 'dan daha kötü bir alternatif ise uyumsuzluk kümesi oluşturulur.

$$D_{(p,q)} = \{j | V_{pj} < V_{qj}\} \quad (17)$$

Uyum küme sayısı ile uyumsuzluk küme sayısı eşittir.

Adım 5. Uyum ve uyumsuzluk indekslerinin hesaplanması: Uyum ve uyumsuzluk kümeleri kullanılarak uyum matrisinin oluşturulur. Matrisinin elemanları aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanır.

$$C_{pq} = \sum_{j^*} w_{j^*} \quad (18)$$

$$D_{pq} = \frac{(\sum_{j=0} |v_{pj^0} - v_{qj^0}|)}{(\sum_{j=0} |v_{pj^0} - v_{qj^0}|)} \quad (19)$$

Adım 6. Üstünlük karşılaştırmasının yapılması: Uyum ve uyumsuzluk indeksleri hesaplanmasından sonra alternatiflerin ikişerli olarak birbirine göre baskınlığını belirlemek için üstünlük karşılaştırması yapılmalıdır. Bu amaçla C ve D değerlerinin ortalamaları (\bar{C} ve \bar{D}) hesaplanır.

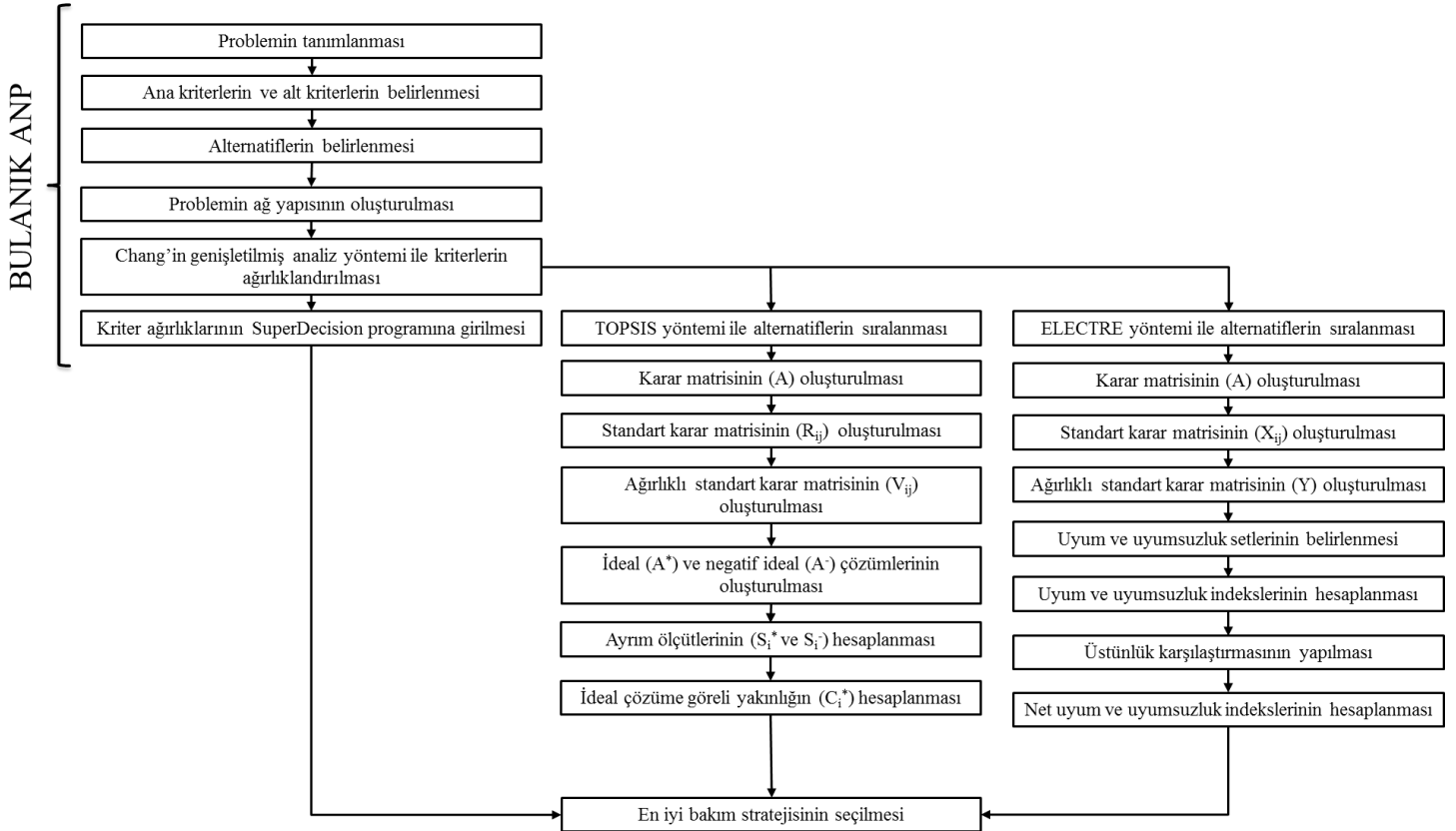
Adım 7. Net uyum ve uyumsuzluk indekslerinin hesaplanması: Aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak C_p ve D_p değerleri hesaplanır. C_p değerleri büyükten küçüğe, D_p değerleri ise küçükten büyüğe doğru sıralanır. En büyük "C" değeri ve en küçük "D" değerinin seçilmesiyle son sıralama oluşturulur.

$$C_p = \sum_{k=1, k \neq p}^m C_{pk} - \sum_{k=1, k \neq p}^m C_{kp} \quad (20)$$

$$D_p = \sum_{k=1, k \neq p}^m D_{pk} - \sum_{k=1, k \neq p}^m D_{kp} \quad (21)$$

4. Uygulama

Bu çalışma Ankara'da solunum cihazları için hortum devreleri üreten bir medikal işletmesinde gerçekleştirilmiştir. Bu işletmenin seçilmesindeki amaç COVID-19 salgını kapsamında hastanelerin yoğunlukla ihtiyaç duyduğu ve yerli olarak da üretilen solunum cihazlarının üretiminin aksamamasıdır. İşletmedeki bütün üretilen hortumların hammaddeden ürüne dönüştürüldüğü yer hortum çekme makinesidir. Makinenin üretimde öneminin çok büyük olduğu için herhangi bir arızanın meydana gelmesi üretimin durmasına ve siparişlerin gecikmesine sebebiyet vermektedir. Bu sebeple işletmenin en kritik makinesi olan hortum çekme makinesi için bir bakım strateji seçimi yapılması problemi ele alınmıştır. Problemin çözümünde güvenlik, katma değer, maliyet, uygunluk ve teknik kriterlerine bağlı 14 alt kriter ve düzeltici bakım, periyodik bakımı duruma dayalı bakım ile revizyon bakım olmak üzere 4 alternatif seçilerek uygun olan çok kriterli karar verme yöntemlerinin uygulaması yapılmıştır. Yapılan çalışma için problemin akış diyagramı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Problemin Akış Diyagramı

4.1. Kriterlerin Belirlenmesi

Kriterlerin belirlenmesinde; işletme başmühendisi ile görüşülerek ve bakım strateji seçimi ile ilgili yapılan önceki çalışmalardaki kriterler incelenerek çalışmaya uygun olan 5 ana kriter ile 16 alt kriter belirlenmiştir. Ancak; Güvenlik ana kriterinin “Ürün Güvenliği” ve Teknik ana kriterinin alt kriteri olan “Ekipman Desteği” kriterleri bütün alternatifler için aynı olması nedeniyle çıkartılmıştır ve 14 alt kriterle uygulama gerçekleştirilmiştir. Çalışma için belirlenen ana ve alt kriterler Tablo 1’de ifade edilmiştir.

Tablo 1. Ana ve Alt Kriterler

Ana Kriterler	Alt Kriterler	Kriter Açıklaması
A. Güvenlik	A1. Personel Güvenliği	İşletmede bir arıza gerçekleştiğinde ya da arızadan kaynaklanan bir olay sonucu personelin zarar görmesi
	A2. Tesis Güvenliği	İşletmede bir arıza gerçekleştiğinde ya da arızadan kaynaklanan bir olay sonucu tesiste meydana gelen zarar
B. Katma Değer	B1. Yedek Parça Stoğu	İşletmelerde bulunan makine ve ekipmanların, bakım veya onarımı aşamasında gerekli yedek parçaların stokta tutulmasının maliyeti (Bevilacqua ve Braglia, 2000)
	B2. Üretim Kayıpları	Kritik olan makine veya ekipmanın arızalanmasının üretime etkisi
	B3. Ürün Kalitesi	Makinede veya ekipmanda oluşabilecek herhangi bir arıza üretim aşamasındaki ürünün kalitesine etkisi (Momeni vd. , 2011)
C. Maliyet	C1. Donanım Maliyeti	Bakım-onarım esnasında veya arıza tespitinde kullanılan; cihazları tamamının maliyeti (Görener, 2012)
	C2. Yazılım Maliyeti	Bakım- onarım esnasından veya arıza tespiti aşamasında elde edilen verilerin analizinin yapılması için kullanılan aletlerin yazılımlarının maliyeti
	C3. Eğitim Maliyeti	Seçilen bakım stratejisinin uygulanmasında görevli olan personellerin tabi tutulacak eğitimlerin maliyeti
D. Uygunluk	D1. Kabul Görme	Seçilen bakım stratejisinin yöneticiler ve işletme personelleri için kolay anlaşılmalı, mümkün olduğunca çabuk benimsenmeli ve uygulanma açısından zor olmamalı.
	D2. Finansal Kaynak	Seçilen bakım stratejisini uygulamak için gerekli parasal kaynaklar

Tablo 2 (devam). Ana ve Alt Kriterler

Ana Kriterler	Alt Kriterler	Kriter Açıklaması
E. Teknik	E1. Makine Önemi	Seçilen bakım stratejisinin uygulanacağı makinenin tesisin üretimini devam ettirebilmesi açısından önemi
	E2. Teknik Güvenilirlik	Bakım stratejisinin uygulanabilmesi için gerekli olan altyapının olmasını ve stratejinin teknik açıdan ne kadar güvenilir olduğu
	E3. Arızalar Arası Süre	Makine ve ekipmanın arızaları arasında geçen ortalama süre
	E4. Bakım Süresi	Seçilen bakım stratejisinin uygulanması için gerekli olan süre

4.2. Alternatiflerin Belirlenmesi

Literatürdeki bakım strateji seçimi çalışmalarında genel olarak periyodik bakım, duruma dayalı bakım, toplam üretken bakım, kestirimci bakım, düzeltici bakım gibi alternatifler kullanılmıştır. Bu çalışmada hortum çekme makinesi için uygulanacak bakım stratejisi seçimi için uygulamaya katkı sağlayan işletme başmühendisinin önerileri ve literatür araştırması ile işletmenin genel durumu da göz önüne alınarak düzeltici(arizi) bakım, periyodik bakım, duruma dayalı bakım ve revizyon bakım olmak üzere 4 alternatif belirlenmiştir.

4.2.1. Düzeltici (arizi) bakım

Tesislerde kullanılan makinelerin ve ekipmanların; fiziksel özellikleri ile çalışma fonksiyonlarının gerektirdiği durumlara göre, belirli ölçme ve değerlendirme teknikleri kullanılarak, arıza oluşumunu engellemek amacıyla önceden arızayı öngörmeye dayalı bir bakım uygulamasıdır (<http://kontrolmedya.com/bakim-onarim-ve-onemi/> Erişim Tarihi: 01. 01. 2021/20:42).

4.2.2. Periyodik bakım

Makinelerin uzun sürede çalışmasını hedefleyen, ekipmanların çalışma süresinin uzatılması ve ani durmaların azalmasını sağlayan, planlı olarak yapılan bir bakım türüdür. Diğer bakım stratejileri arasında periyodik bakım en verimli ve en güvenli olanıdır. Bu bakım stratejisinde, arızaların veya ani durmaların olmasını beklenmeden periyodik olarak yapılan bakım ile olması mümkün arızalar önlenmektedir (<http://kontrolmedya.com/bakim-onarim-ve-onemi/> Erişim Tarihi: 01. 01. 2021/20:42).

4.2.3. Duruma dayalı bakım

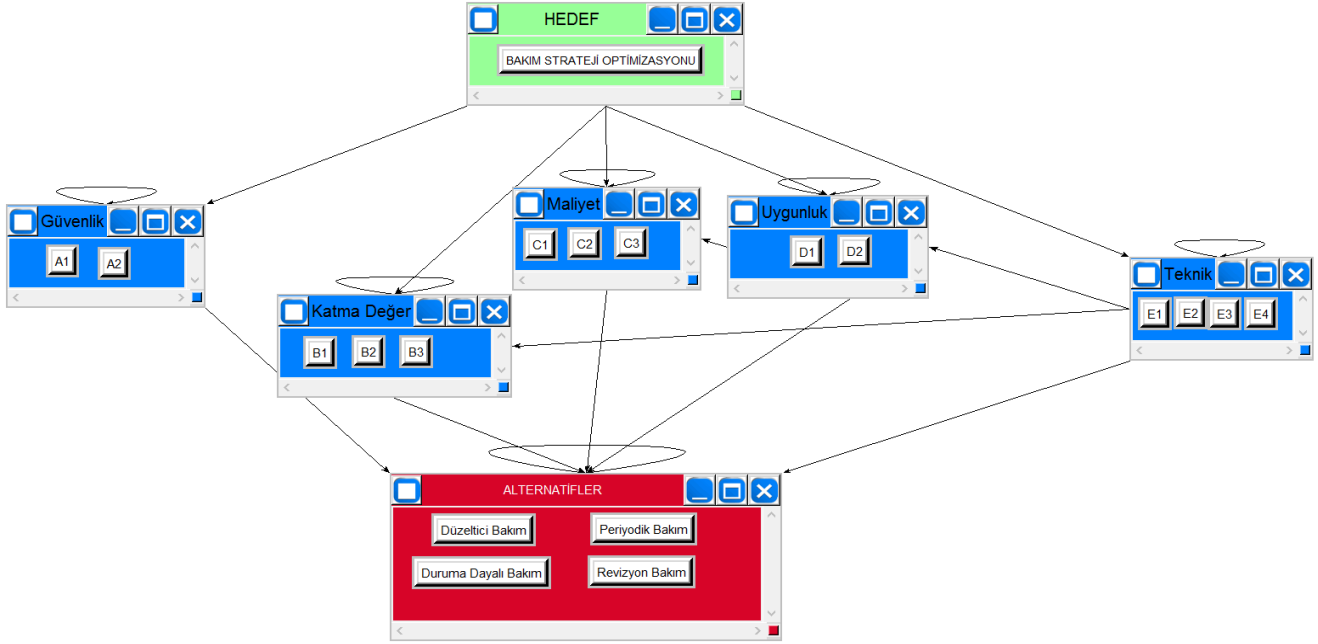
Duruma dayalı bakım stratejisinde bir dizi ölçüm ve veri toplama sistemi ile makine performansları gerçek zamanlı izlenir ve bakım kararı verilir (Bevilacqua ve Braglia, 2000). Çalışma koşullarının sürekli izlenmesi, makine/ekipmanların mevcut durumlarına göre bakım kararları alınmasını sağlar. Böylece bu bakım stratejisinde gereksiz bakımdan kaçınarak makine/ekipmanın arızadan hemen öncesine kadar çalışması sağlanmış olur (Al-Najjar ve Alsyouf, 2003).

4.2.4. Revizyon bakım

Belirli bir çalışma saatini tamamlayan makine veya ekipmanın gerekli bakımının yapılması veya gerekli görülen parçaların değiştirilmesi gibi çalışmaların yapıldığı bakım türüdür. Revizyon bakımdan çıkan makine veya ekipman yeni gibi işlevine devam eder. Bakım stratejileri arasında en kapsamlı ve en zor olanı revizyon bakımdır. Uygulanması için yüksek yatırım maliyetleri gereklidir. Ayrıca bakımı yapan personelleri geniş bilgi birikimine ve tecrübeye sahip olması gerekmektedir. Ancak revizyon bakımının uygulanması sonucunda etkili sonuçlar elde edilir.

4.3. Bulanık ANP Yöntemi

Kriterler ve alternatifler belirlendikten sonra daha önce yapılmış çalışmaların ışığında ve işletme başmühendisi ile görüşülmesi sonucunda en uygun bakım stratejisinin seçimi için problemin ağ yapısı oluşturulmuştur. Bu ağ yapısında, uygulamanın hedefi olan "Bakım Strateji Seçimi" tüm ana kriterler ile ilişkili olduğu için tek yönlü oklarla bağlanmıştır. Ayrıca bütün ana kriterler de kendi alt kriterleriyle ilişkili olduğu için dönel ok yardımıyla bağlanmıştır. Uygunluk ana kriterinin *Finansal Kaynak(D2)* alt kriteri Maliyet ana kriteri ile, Teknik ana kriterinin *Bakım Süresi(E4)* alt kriteri Uygunluk ana kriteri ile ve Teknik ana kriterinin *Makine Önemi(E1)* alt kriteri Katma Değer ana kriteri ile ilişkili olduğu için birbirlerine bağlanmıştır. Ayrıca bütün ana kriterler alternatifler ile ilişkili olduğu için tek yönlü oklar yardımıyla bağlanmasıyla oluşturulan ağ yapısı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Ana ve alt kriterler arasındaki ağ yapısı

Ağ yapısının oluşturulmasından sonra ana ve alt kriterlerin ikili karşılaştırma matrisleri oluşturularak karar verici grubu tarafından değerlendirilmiştir. Karar vericilerin değerlendirme yaparken dilsel ifadeler kullanması çalışmanın bulanık bir çok kriterli karar verme çalışması olmasına sebebiyet vermiştir. Elde edilen dilsel ifadelerin uygun olduğu bulanık set seçilerek Tablo 2’de gösterilmiştir. Karar vericilerin değerlendirmesi sonucu elde edilen dilsel ifadeler karşılık geldikleri bulanık sayılara dönüştürülmüştür. Chang’ın Genişletilmiş Analiz Yöntemi Algoritması kullanılarak ikili matrislerde her ana ve alt kriterin ağırlıkları bulunmuştur. Kriterlerin ağırlıkları Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Dilsel İfadeler ve Üçgen Bulanık Set (Kahraman vd. 2004)

Dilsel İfadeler	Önem Derecesi	Önem Derecesinin Eşiti
Eşit Önemli	(1,1,1)	(1,1,1)
Daha Önemli	(2/3, 1, 3/2)	(2/3, 1, 3/2)
Çok Daha Önemli	(3/2, 2, 5/2)	(2/5, 1/2, 2/3)
Çok Fazla Önemli	(5/2, 3, 7/2)	(2/7, 1/3, 2/5)
Kesin Önemli	(7/2, 4, 9/2)	(2/9, 1/4, 2/7)

Tablo 4. Kriter Ağırlıkları

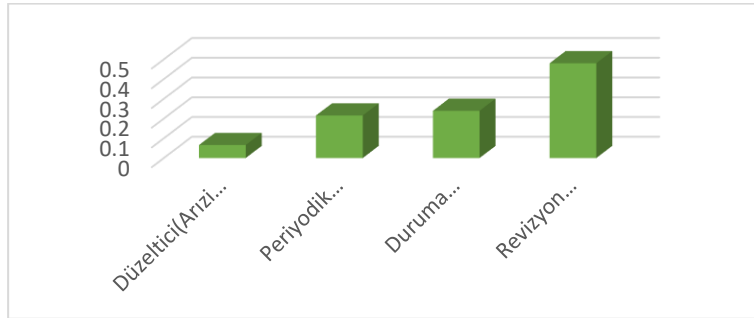
Kriterler	Ana Kriter Ağırlıkları	Alt Kriter Önem Ağırlıkları	Kriter Genel Ağırlıkları
A. Güvenlik	0,169		
A1. Personel Güvenliği		0,599	0,120
A2. Tesis Güvenliği		0,401	0,080
B. Katma Değer	0,097		
B1. Yedek Parça Stoğu		0,515	0,103
B2. Üretim Kayıpları		0,417	0,083
B3. Ürün Kalitesi		0,068	0,014
C. Maliyet	0,255		
C1. Donanım Maliyeti		0,466	0,093
C2. Yazılım Maliyeti		0,347	0,069
C3. Eğitim Maliyeti		0,186	0,037

Tablo 5 (devam). Kriter Ağırlıkları

Kriterler	Ana Kriter Ağırlıkları	Alt Kriter Önem Ağırlıkları	Kriter Genel Ağırlıkları
D. Uygunluk	0,276		
D1. Kabul Görme		0,799	0,160
D2. Finansal Kaynak		0,201	0,040
E. Teknik	0,202		
E1. Makine Önemi		0,480	0,096
E2. Teknik Güvenilirlik		0,292	0,058
E3. Arızalar Arası Süre		0,207	0,041
E4. Bakım Süresi		0,021	0,004

Tablo 3’de görüldüğü gibi, hortum çekme makinesi için bakım strateji seçiminde ağırlığı en yüksek olan ana kriter %27.6 ile “Uygunluk” kriteridir. Onu %25.5 ile “Maliyet”, %20.2 ile “Teknik” ve %16.9 ile “Güvenlik” kriteri takip etmektedir. En düşük ağırlığa sahip kriter ise %9.7 ile “KatmaDeğer” kriteridir. Tablo 3’de alt kriterlere bakıldığında en önemli alt kriterin %16 ile “Kabul Görme” dir. Onu %12 ile “Personel Güvenliği” alt kriteri takip etmektedir. Elde edilen sonuçların gerçek hayattaki tutarlılığı karşılaştırıldığında seçilen bakım stratejisinin işletmenin yapısı ve hortum çekme makinesi için uygun olması diğer kriterlere göre daha fazla önem arz etmektedir. Uygunluktan sonra seçilen stratejinin gerçekleştirilmesi için katlanılması gereken maliyetin önemi de fazladır. Gerçek hayatla tutarlı sonuçların elde edilmesi sonucun geçerli olduğunu göstermektedir.

Kriter ağırlıklandırılmadan sonra her ana ve alt kriter için 4 alternatifle arasında olan ilişkiler ile ikili karşılaştırma matrisler oluşturularak karar verici grubu tarafından Tablo 2’deki dilsel ifadelerle değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda elde edilen ifadeler bulanık sayılara dönüştürülerek Chang’ın Genişletilmiş Analiz Yöntemi Algoritması ile hesaplamalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ve kriter ağırlıkları Super Decision paket programına manuel olarak girilerek alternatiflerin sıralanması gerçekleştirilmiştir. Sıralama sonucu Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 3. Bulanık ANP Sonucu Alternatiflerin Sıralanması

Bulanık ANP alternatif sıralaması için Şekil 3’e bakıldığında hortum çekme makinesi için bakım stratejileri arasında “Revizyon Bakım”ın ilk sırada olduğu, “Düzeltici(Arzi) Bakım”ın son sırada olduğu görülmektedir. Elde edilen alternatiflerin sıralanmasında hem etkili sonuçlar vermesi hem de hortum çekme makinesi için uygunluğu açısından karar verici grup tarafından beklenen bir sıralama olduğu ifade edilmiştir.

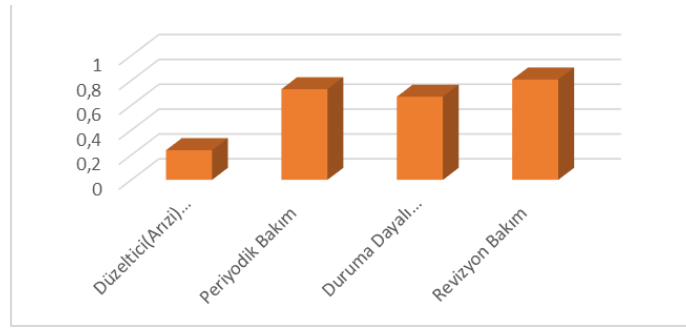
4.4. TOPSIS Yöntemi

Tablo 6. Karar Matrisi

	A1	A2	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	E1	E2	E3	E4
ALT. 1	1	1	2	2	2	6	6	10	1	8	1	1	2	6
ALT. 2	9	9	8	9	8	3	2	6	9	6	10	10	5	10
ALT. 3	8	8	6	5	6	5	4	6	7	7	9	9	8	7
ALT. 4	10	10	9	10	9	4	3	6	10	3	10	10	10	9

Bakım strateji seçimini etkileyen ana ve alt kriterlerin önem dereceleri Bulanık ANP yöntemi ile belirlenmiştir. Kriterlerin önem dereceleri, alternatiflerin TOPSIS yöntemi ile sıralanmasında kullanılmıştır. TOPSIS yönteminde kullanılan kriterlerin önem dereceleri Tablo 3’de gösterilmektedir. TOPSIS yönteminde kullanılacak olan karar matrisi satırlara alternatiflerin sütunlara da kriterlerin yazılması ile oluşturulmuş ve karar verici grubu tarafından 1-10 puan skalası kullanılarak değerlendirilmiştir. Ortak bir değerlendirme puanı kullanılması amacıyla elde edilen puanların geometrik ortalaması alınmıştır. Oluşturulan karar matrisi Tablo

4'te gösterilmektedir. Bulanık ANP'de hesaplanan kriter ağırlıkları ve standart karar matrisi çarpılarak ağırlıklandırılmış standart karar matrisi oluşturulmuştur. Oluşturulan matris kullanılarak ideal çözüm ile negatif ideal çözüm setleri hazırlanmış ve sapma miktarları hesaplanmış, çözüm setlerine olan yakınlıklar sıralanmıştır. Diğer bir ifadeyle hortum çekme makinesi için uygulanacak bakım strateji alternatiflerinin sıralaması elde edilmiştir. Şekil 4 'de bulunan alternatiflerin sıralaması elde edilmiştir.



Şekil 4. TOPSIS Sonucu Alternatiflerin Sıralanması.

Şekil 4 incelendiğinde ana ve alt kriterler dikkate alınarak, %85 ile en yüksek orana sahip olan “Revizyon Bakım” TOPSIS yöntemi tarafından en uygun alternatif olarak sunulmaktadır. Elde edilen sıralamada %23 ile en düşük orana sahip olan “Düzeltici(Arızı) Bakım” alternatifinin en son sırada olduğu görülmektedir.

4.5. ELECTRE Yöntemi

TOPSIS yönteminde kullanılan karar matrisi ELECTRE yönteminde de kullanılmıştır. Öncelikle karar matrisi normalize edilerek standart karar matrisi oluşturulmuştur. Daha sonra Bulanık ANP yönteminde bulunan kriterler ile standart karar matrisindeki değerler çarpılmış ve ağırlıklı standart karar matrisi oluşturulmuştur. Ağırlıklı standart karar matrisi kullanılarak 4 alternatif her bir kritere göre tek tek karşılaştırılmış, bunun sonucunda uyum kümesi ve uyumsuzluk kümesi oluşturulmuştur. Oluşturulan kümelerden yararlanılarak uyum (C) ve uyumsuzluk (D) indeksleri hesaplanmış, alternatiflerin birbirlerine göre üstünlük karşılaştırmaları yapılmıştır. Net uyum ve net uyumsuzluk indeksleri hesaplandıktan sonra net uyum (C) indeksleri küçükten büyüğe ve net uyumsuzluk (D) indeksleri büyükten küçüğe sıralanmıştır. Net uyum ve uyumsuzluk indeksleri ile sıralama sonucu Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 7. Net Uyum ve Uyumsuzluk İndeksleri

C1	-1,47583	D1	2,06573
C2	0,19101	D2	-0,22562
C3	-0,51157	D3	0,36303
C4	1,79639	D4	-2,08180

(C) değeri en büyük olan ve (D) değeri en küçük olan alternatif “en iyi bakım strateji alternatifi” olarak belirlenmiştir. TOPSIS yönteminde elde edilen sıralama sonucuyla aynı sıralama elde edilmiştir. Tablo 6'da verilen sıralama sonucuna göre ilk sıradaki “Revizyon Bakım” en iyi alternatif olarak görülürken “Düzeltici (Arızı) Bakım” son sıradaki alternatif olmuştur.

Tablo 8. ELECTRE Sonucu Alternatiflerin Sıralanması

Cp'ye göre sıralama	Dp'ye göre sıralama	Son sıralama
C4	D4	Revizyon Bakım
C2	D2	Periyodik Bakım
C3	D3	Duruma Dayalı Bakım
C1	D1	Düzeltici(Arızı) Bakım

4.6. Sonuçların Değerlendirilmesi

Yapılan çalışmada üç farklı çok kriterli karar verme yöntemi olan Bulanık ANP, TOPSIS ve ELECTRE için uygulamalar yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Elde edilen nihai sonuçları Tablo7'de gösterilmektedir.

Tablo 9. Sonuçların Karşılaştırılması

Alternatifler	Bulanık ANP	TOPSIS	ELECTRE
Düzeltilici(Arızı) Bakım	4	4	4
Periyodik Bakım	3	2	2
Duruma Dayalı Bakım	2	3	3
Revizyon Bakım	1	1	1

Tablo 7'ye bakıldığında alternatiflerin sıralanmasında TOPSIS ve ELECTRE yöntemlerinin sonucunda sıralamaların aynı olduğu görülmektedir. Elde edilen alternatif sıralamalarının aynı çıkması, değerlendirilen kriterlerin birbirlerine yakınlığının çok fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Bulanık ANP yönteminde elde edilen sıralamada ise sadece iki alternatifin yer değiştirdiği görülmektedir. Bu üç sıralama sonucunda ilk sırada “Revizyon Bakım” yer alırken son sırada “Düzeltilici(Arızı) Bakım” olduğu görülmüştür. Revizyon bakımın arızalar arasındaki süreyi kısaltması, teknik güvenilirliğinin yüksek olması ve güvenlik açısından diğer alternatiflere oranla daha iyi olması ile makine için en iyi alternatif olduğu düşünüldüğü için ilk sırada yer almıştır. Buna göre, kullanılan çok kriterli karar verme yöntemlerinde tutarlı bir şekilde “Revizyon Bakım”ın en iyi alternatif olduğu sonucuna varılmıştır.

5. Sonuç

Dünya koşullarının giderek değişmesi sonucunda özellikle üretim yapan işletmeler arasındaki rekabet artmaktadır. Bu rekabet ortamında işletmeler makine ve ekipmanları korumaya, böylelikle üretimdeki sürekliliği sağlamaya daha fazla önem vermeye başlamıştır. Makine/ekipmandaki beklenmedik arızaların üretimdeki durmalara ve maddi kayıplara sebebiyet vermektedir. Üretimdeki bir makine ve ekipmanın ekonomik ömrü boyunca işlevine devam etmesi ve sürekliliği sağlaması için bir dizi bakım faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bakım faaliyetlerinin planlı bir şekilde, zaman ve maliyet kaybı yaşanmadan gerçekleştirilebilmesi için uygun bakım stratejisinin seçilmesi en önemli unsurdur.

Bu çalışmada, solunum cihazları için hortum devreleri üreten bir medikal işletmesinin üretim hattındaki en önemli elemanı olan hortum çekme makinesi için uygun bakım stratejisinin seçilmesi problemi ele alınmıştır. Çalışmanın Covid-19 salgını kapsamında bir medikal işletmesinde gerçek verilerin kullanılarak yapılması literatürdeki diğer çalışmalardan farkını ortaya koymaktadır.

Çalışmada öncelikle işletme başmühendisinin önerileri ve literatürdeki çalışmaların ışığında problem için en uygun kriterler ve alternatifler belirlenmiştir. Daha sonra Chang'ın genişletilmiş analiz yöntemi kullanılarak kriterlerin ağırlıkları belirlenmiştir. Elde edilen kriter ağırlıkları Bulanık ANP yönteminde kullanılarak alternatiflerin sıralanması yapılmıştır. Bulanık ANP yönteminde elde edilen sonucun kabul edilebilir olduğundan emin olmak amacıyla TOPSIS ve ELECTRE yöntemlerinin de uygulaması ile hortum çekme makinesi için en uygun bakım stratejisinin seçimi yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda hortum çekme makinesi için en uygun bakım stratejisi “Revizyon Bakım” olarak seçilmiştir. Revizyon bakım ile oluşabilecek arızaların sıklığı, ortalama bakım süresi ve üretimdeki kayıplar azaltılması sağlanabilecektir.

İleride yapılacak çalışmalarda belirlenen kriterlere ve alternatiflere yenileri eklenerek sayıları arttırılabilir. Ayrıca makine/ekipman sayısı çoğaltılarak bakım strateji seçimi uygulaması gerçekleştirilebilir. Problemin yapısına göre farklı bulanık yöntemler ve bulanık setler ile modellenilebilir. Ayrıca işletmedeki maliyet ve zaman kayıplarının önüne geçmek için bakım strateji seçimi ve bakım planlaması birleştirilerek daha kapsamlı çalışmalar yapılabilir.

Referanslar

- Al-Najjar B., Alsayouf, I., (2003) “ Selecting the most efficient maintenance approach using fuzzy multiple criteria decision making”, *International Journal of Production Economics*, 84(1), 85–100.
- Bevilacqua M., Braglia M., (2000), “The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection”, *Reliability Engineering & System Safety*, 70(1), 71–83.
- Cayir Ervural B., Evren R., Delen D., (2018), “A multi-objective decision-making approach for sustainable energy investment planning”, *Renewable Energy*, 126, 387–402.
- Chang D.Y., (1996), “Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP”, *European Journal of Operational Research*, 95(3), 649–655.
- Çankoru A.M., Sayın V.O., (2011), “Bakım Maliyeti Yönetimi”, “Mühendis ve Makine Dergisi”, 53(635), 16-21.
- Emovon I., Norman R. A., Murphy, A. J., (2018) “Hybrid MCDM based methodology for selecting the optimum maintenance strategy for ship machinery systems”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(3), 519–531.
- Gençer M.A., Yumuşak R., Özcan E., Eren T., (2021), “An Artificial Neural Network Model for Maintenance Planning of Metro Trains”, *Politeknik Dergisi, Erken Görünüm*.

- Görener A. (2013) “Bir imalat işletmesine bakım stratejisinin belirlenmesi”, TMMOB MMO Mühendis ve Makine Dergisi, 53(627), 51-62.
- Görener A., (2012), “ Bakım stratejilerinin bulanık karar ortamında seçimi için WSA ve TOPSIS yöntemlerinin uygulanması”, Journal of Engineering and Natural Sciences, (216), 159–177.
- Hemmati N., Rahiminezhad Galankashi M., Imani D. M., Farughi H., (2018), “Maintenance policy selection: a fuzzy-ANP approach”, Journal of Manufacturing Technology Management, 29(7), 1253–1268.
- Hwang CL ve Yoon K., (1981), “Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications.” ,Springer-Verlag.
- Iangkumaran M., Kumanan, S., (2009), “Selection of maintenance policy for textile industry using hybrid multi-criteria decision making approach”, Journal of Manufacturing Technology Management, 20(7), 1009–1022.
- Jafari A., Jafarian M., Zareei A., Zaerpour, F., (2008), “Using Fuzzy Delphi Method in Maintenance Strategy Selection Problem”, Journal of Uncertain Systems, 2(4), 289–298.
- Joshua J., Mathew S.G., Harikrishnan A.R., (2016), “Selection of an maintenance strategy for improving the production efficiency in a casting unit”, IJSTE - International Journal of Science Technology & Engineering, 3(2), 138-141.
- Kahraman C., Cebeci U., Ruan D., (2004), “Multi-attribute comparison of catering service companies using fuzzy AHP: The case of Turkey. International Journal of Production”, European Journal of Science and Technology Economics, 87(2), 171–184.
- Kundakçı N., (2019), “ Selection of Maintenance Strategy For a Manufacturing Company with Fuzzy Moora Method”, 2nd International Conference on Business, Management & Economics, Vienna/Austria.
- Kurian M.C., Shalij P.R., Pramod V.R., (2019), “Maintenance strategy selection in cement industry using analytic network process”, Journal of Quality in Maintenance Engineering.
- Momeni M., Fathi M. R. , Zarchi M. K., Azizollahi S., (2011) “A Fuzzy TOPSIS-Based Approach to Maintenance Strategy Selection: A Case Study”, Middle-East Journal of Scientific Research, 8 (3), 699-706.
- Odeyale S. O., Alamu O. J., Odeyale, E. O., (2013), “The Analytical Hierarchy Process Concept for Maintenance Strategy Selection in Manufacturing Industries”, The Pacific Journal of Science and Technology, 14(1), 223-233.
- Özcan E., Eren T., (2014), “Application of TOPSIS Method for Maintenance Planning: Natural Gas Combined Cycle Power Plant Case Study”, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 6(2), 26-38.
- Özcan E., Ünlüsoy S., Eren T., (2017), “A combined goal programming – AHP approach supported with TOPSIS for maintenance strategy selection in hydroelectric power plants”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 78, 1410–1423.
- Özcan E., Danişan T., Eren T., (2019), “Hidroelektrik santralların en kritik elektriksel ekipman gruplarının bakım stratejilerinin seçimi için matematiksel bir model önerisi”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 25(4), 498-506.
- Özcan E., Yumuşak R., Eren T., (2019), “Risk Based Maintenance in the Hydroelectric Power Plants”, Energies, 12(8), 1502.
- Özcan E., Danişan T., Eren T., (2020),” Hidroelektrik santrallarda bakım çizelgeleme için hibrid bir model önerisi”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 35(4), 1815-1827.
- Özcan E., Danişan T., Yumuşak R., Eren T., (2020), “An artificial neural network model supported with multi criteria decision making approaches for maintenance planning in hydroelectric power plants”, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 22 (3), 400–418.
- Özcan E., Gür Ş., Eren T., (2021), “A Hybrid Model to Optimize the Maintenance Policies in the Hydroelectric Power Plants”, Politeknik Dergisi, 24(1), 75-86.
- Panchal D., Chatterjee P., Shukla R. K., Choudhury T., Tamosaitiene, J., (2017), “Integrated Fuzzy AHP-CODAS Framework for Maintenance Decision In Urea Fertilizer Industry”, Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research, 51(3), 179–196.
- Seiti H., Tagipour R., Hafezalkotob A., Asgari F., (2017), “Maintenance strategy selection with risky evaluations using RAHP”, Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, 24(5-6), 257-274.
- Shafiee, M., (2015), “Maintenance strategy selection problem: an MCDM overview” Journal of Quality in Maintenance Engineering, 21(4), 378-402.
- Sianturi G., Riyanto A., Maulana R., (1996), “Maintenance Strategy Selection in Spinning Mills Industry Using Fuzzy AHP”, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020.

Tunca M.Z., Aksoy E., Bülbül H., Ömürbek N., (2015) “AHP Temelli TOPSIS ve ELECTRE Yöntemiyle Muhasebe Paket Programı Seçimi”, Niğde Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 8 (1), 53-71.

Wang L., Chu J., Wu J., (2007), “Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process”, International Journal of Production Economics, 107(1), 151–163.

Velasquez M., Hester T.P.,(2013), “An analysis of multi-criteria decision making methods”, International Journal of Operations Research, 10(2), 56-66.

Yumuşak R., Özcan E., Danişn T., Eren T.,(2018), “AHP-TOPSIS-Tam Sayılı Programlama Entegrasyonu ile Hidroelektrik Santrallarda Bakım Strateji Seçimi”, Uluslararası GAP Yenilenebilir Enerji Ve Enerji Verimliliği Kongresi.

Zaeri M. S., Shahrabi J., Pariazar M., Morabbi A., (2007), “A combined multivariate technique and multi criteria decision making to maintenance strategy selection”, 2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 621–625.

<http://kontrolmedya.com/bakim-onarim-ve-onemi/> Erişim Tarihi: 01.01.2021/20:42.



Termokromik Pigment İçeren Kaplamalarda İşlem Sıcaklık Etkisi

Temperature Effect in Thermochromic Pigment Containing Coatings

Lale Civan ¹ , Semra Kurama ¹ , Erhan Ayas ¹ 

¹Eskisehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, 26555, Eskişehir, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 06/02/2021

Kabul / Accepted: 26/02/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 23/05/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Bu çalışmada, kaplama yapmak için ticari olarak temin edilebilen ve 33°C'nin üzerinde yeşilden beyaza, 45°C'nin üzerinde siyahtan beyaza ve 65°C'nin üzerinde maviden beyaza renk değiştiren termokromik pigmentler kullanılmıştır. Farklı sıcaklıklarda ısıl işlem süreci uygulanan kaplamalarda bağlayıcı olarak polivinilpirolidon kullanılmıştır. Hazırlanan kaplamaların renk, faz, mikroyapı analizleri yapılmış, renk değişim sıcaklıkları kızılötesi termometre ve kızılötesi termal kamera ile karakterize edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, günlük hayatta yaşanan olası sıcaklık değişimlerinin ve risklerin yaşam konforunu değiştirmeden bu yöntem ile tespit edilebileceği ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler

“Termokromik, Pigment, Kaplama, Renk değişimi, Sıcaklık”

Abstract

In this study, commercially available thermochromic pigments that change color from green to white above 33°C, black to white above 45°C, and blue to white above 65°C were used to make coatings. Polyvinylpyrrolidone was used as a binder in coatings where heat treatment processes were applied at different temperatures. Color, phase, microstructure analyzes of the prepared coatings were done and the color change temperatures were characterized by an infrared thermometer and an infrared thermal camera. As a result of the performed studies, it has been revealed that possible temperature changes and risks experienced in daily life can be detected by this method without changing the comfort of life.

Key Words

“Thermochromic, Pigment, Coating, Color change, Temperature”

1. Giriş

Akıllı malzemeler bir dış uyarana yanıt olarak fiziksel özelliklerini dinamik olarak değiştirebilir. Uyarıcı, uygulanan mekanik kuvvet, basınç, manyetik alan, elektrik alanı veya elektromanyetik radyasyon gibi fiziksel bir etkileşim şeklinde olabilir. Uyarıcı ayrıca, sıcaklık, pH veya kimyasal bileşim gibi malzemenin bulunduğu ortam koşullarında bir değişiklikten de oluşabilir (Rossi vd., 2021). Yapı malzemeleri, kentsel mekanın ısı davranışında ve binanın enerji tüketiminde ve iç mekan çevre kalitesinde önemli bir rol oynar. Son zamanlarda, enerji kullanımını en aza indirmek, iç ve dış mekan termal konforunu iyileştirmek ve kentsel aşırı ısınmayla mücadele etmek için etkili bir yöntem olarak optik yapı malzemelerine ve kaplamalara ilgi artmaktadır. Termokromik malzemeler gelişmiş optik malzemelerden biridir (Garshasbi & Santamouris, 2019).

Termokromik malzemeler, sıcaklık değişiminin neden olduğu faz geçişi sonucu renk değiştirir ve sıcaklık değişimine yanıt olarak optik özellikleri tersine çevirebilir. Güneş enerjisini dinamik olarak yöneterek, yani sıcak mevsimlerde istenmeyen güneş ısı kazanımını sınırlandırarak ve soğuk mevsimlerde daha fazla güneş ısı kazanımına izin vererek binanın güneş ısı kazanımını düzenleyebilir (Cheng vd., 2018; Hu & Yu, 2020). Termokromik malzemeler, hem endüstriyel makineler hem de mutfak aletlerinin yanı sıra buzlu yol koşulları uyarıları için yol işaretlerinde de uygulama alanı bulabilir. Ayrıca, termokromik pigmentler binaların enerji verimliliğini artırmak için çatı kaplamalarında kullanılabilir veya artık şarj miktarını izlemek için pil test cihazlarına uygulanabilir (Ferrara & Bengisu, 2014). Günümüzde farklı araştırma alanlarında, dış uyaranlar tarafından kontrol edilen özelliklere sahip akıllı malzemelerin geliştirilmesi için önemli çabalar sarf edilmektedir. Dış parametrelerin değişmesiyle tersine değişen optik özelliklere sahip kromojenik malzemeler de akıllı yapı malzemeleri olarak ilgi çekicidir (Pérez vd., 2018). Kromojenik malzemeler, akıllı malzemelerin bir alt sınıfını oluşturur ve rengi tersine dönüştürebilir özelliğe sahiptir (Ferrara & Bengisu, 2014). Rengi tersine çevirebilen kromojenik malzemeler, çevre ile etkileşime giren kaplamaların oluşturulmasında kullanılabilir ve kullanıcıya önemli bilgiler sağlar (Calovi vd., 2021). Renk değişiklikleri, malzemeler ısıtıldığında veya soğutulduğunda moleküllerin yapı içerisinde geçişine veya dönüşümüne bağlı bir süreçtir (Rajadurai vd., 2020).

Termokromik kaplamalar, çarpıcı estetik özelliklerinin yanı sıra, enerji tasarrufundaki yeniliklere kapı açar (Aklujkar & Kandasubramanian, 2020). Termokromik kaplamalar, güneş ışınımı emilimlerini sıcaklıklarına göre dinamik olarak değiştirebilirler. Renk geçiş sıcaklığından daha yüksek olduğunda, açık tonlarda görünebilir ve daha fazla güneş radyasyonu yansıtabilirler, renk geçiş sıcaklığından daha düşükken, koyu tonlarda görünürler ve daha fazla güneş radyasyonu emerler. Bu nedenle binaların hem soğutma hem de ısıtma yüklerinin azaltılmasına katkıda bulunurlar (Santamouris vd., 2011). Termokromik kaplamalar, binanın ısıtma ve soğutma yükünü azaltmada ve kentsel termal ortamı iyileştirmede büyük uygulama potansiyeline sahiptir (Zhang & Zhai, 2019). Binaların ısıtma ve soğutma yükleri, güneş ışınımının soğurulması ve yansması ile yakından ilişkilidir. Bu nedenle bina kaplama malzemeleri, bina enerji tüketimini büyük ölçüde etkileyebilir. Güneş radyasyonunun bina soğurmasını düzenlemek için yeni tür malzemeler kullanarak bina iklimlendirme enerji tüketimini azaltmak için birçok araştırma yapılmıştır (Yuxuan vd., 2020). Termokromik kaplamalar hali hazırda ambalajlamadan giysiye ve tıbbi ürünlere kadar çeşitli alanlarda da kullanılmaktadır (Berardi vd., 2020). Bu kaplamalarda sıcaklık belirli bir değerden yüksek olduğunda kaplamanın rengi değişir. Sıcaklık bu değerden düşük olduğunda, orijinal renk eski haline döner (Yan vd., 2020). Sıcaklık geçiş sıcaklığından daha düşük olduğunda, termokromik malzemeler koyu renkler sergiler ve güçlü güneş enerjisi emilimi gösterir. Geçiş sıcaklığının üzerinde ise açık renkler sunarlar ve yüksek güneş yansıtma özelliğine sahiptirler (Hu & Yu, 2019). Doğası gereği tersine çevrilebilir organik termokromik sistemlerde, belirli bir sıcaklığın üzerinde ısıtma, renkte daha koyu tonlardan daha açık tonlara bir değişikliğe neden olur. Bu geçiş, pigmentlerin moleküler yapısının, görünür renkte spektral bir değişim üreten termal olarak tersine çevrilebilir bir dönüşümü ile elde edilir. Sıcaklık, renk değiştirme noktasının altına düştüğünde, sistem termal olarak kararlı durumuna geri döner (Karlessi & Santamouris, 2015). Bu süreçte kaplamalarda kullanılan termokromik pigmentler mikrokapsüllemiş termokromik tozlardır.

Termokromik mikrokapsüllerin kompozisyonlara ilavesi kaplamaya sıcaklık değişimi ile tetiklenebilen renk değiştirme fonksiyonu kazandırır (Pedaballi vd., 2019). Sıcaklıkla tersine değişen optik özelliklere sahip kapsüllemiş tersinir termokromik pigmentler, enerji verimliliğini artırmak ve binaların çevresel etkisini azaltmak için bina kaplamalarında kullanılmıştır (Pérez vd., 2020). Termokromik mikrokapsüllerin sıcaklığa duyarlı tersinir sistemleri organik tersinir, inorganik tersinir ve sıvı kristal tersinir kategorilerine ayrılabilir. Termokromik bir sistemdeki çözücüler, sıcaklığa duyarlı malzemelerin termokromik sıcaklığını belirler. Isıya duyarlı renk değiştirme sıcaklığı genellikle kullanılan çözücünün değiştirilmesi ile değiştirilir (Yan vd., 2019). Piyasada bulunan kapsüllemiş tersinir termokromik pigmentler renk oluşturucu, renk geliştirici ve çözücü olmak üzere üç bileşenden oluşur. Düşük sıcaklık için, çözücü katı fazdadır ve renkli durum, renk oluşturucu ile geliştirici arasındaki reaksiyondan kaynaklanır. Sıcaklık yükseldikçe, çözücü erir ve çözücü-geliştirici reaksiyonu baskın hale gelir ve renksiz duruma yol açar. Pigment bileşenleri, zararlı ortamlardan koruma olarak organik mikrokapsüller içine alınır (Pérez vd., 2020).

Termokromik malzemelerin bina kaplamalarında uygulanabilmesi için dönüşüm sıcaklığının, uygulandığı ortamın sıcaklığına uygun olması gerekir. Bu nedenle sistem için malzemelerin, geçiş sıcaklıkları çevre ile uyumlu olacak şekilde seçilir. Boyanın mikrokapsülleme adımı tamamlandıktan sonra, sonraki adım termokromik kaplamalar oluşturmak için bunları kaplama sistemlerine ekleme. Kaplamanın film oluşturucu ögesi olan bağlayıcı, kürlendikten sonra alt tabaka üzerinde kalan kaplamanın polimer desteğidir. Kaplamanın viskozitesini kontrol etmek için kullanılan çözücü uçucudur ve yüzey üzerindeki uygulamada buharlaşır. Kaplamalarda pigmentler ve boyalar, rengi indüklemek için boya sistemine dahil edilir (Aklujkar & Kandasubramanian, 2020). Polivinilpirolidon (PVP), hazırlanan kompozisyonlarda bağlayıcı olarak kullanılan kimyasal kararlılığı ve çözünürlüğü yüksek bir

polimerdir (Kuźmińska vd., 2020). Son yıllarda, termokromik malzemeler ve bunların polimerlere dahil edilmesi sık sık incelenmiştir. Bu malzemeler muazzam bir ilerleme kaydetmiş ve gelişmiş teknolojide giderek daha önemli hale gelmiştir (Štaffová vd., 2021). Akıllı davranışa sahip termokromik kaplamaları, uygun bağlayıcılara eklenen mikrokapsüllemiş organik pigmentlere dayalı olarak literatürde sunulmuştur (Karlessi vd., 2009). Literatürde Rossi vd. hazırladığı kompozisyonda ise pigmentin dağılmasını ve altlığa yapışmasını sağlamak amacıyla epoksi tipi bağlayıcı kullanılmıştır (Rossi vd., 2021). Hazırlanan kaplama çözeltileri uygulama yüzeyinde sabitlenebilmek için ısıl işlemler uygulanmaktadır. Isıl işlem kaplamaların yapısal olarak iyileştirilmesini ve stresin giderilmesini sağlar (Chen & Wei, 2001).

Bu çalışmada üç farklı renk pigment ile bağlayıcı kullanılarak oluşturulan termokromik kaplamaların sıcaklık değişimine bağlı olarak davranışları incelenmiştir. Hazırlanan kaplamaların kullanım ömrünü belirlemek amacıyla 30 ay sonra kaplamaların termokromik performansı tekrar değerlendirilmiştir. Numunelerin ilk yapılışından 30 ay geçmesine rağmen termokromik performansında bir azalma gözlenmemiştir. Uzun süre ısıtma ve soğutma çevrimine tabi tutulan numuneler sürekli renk değiştirmeye devam etmiştir.

2. Materyal ve Metot

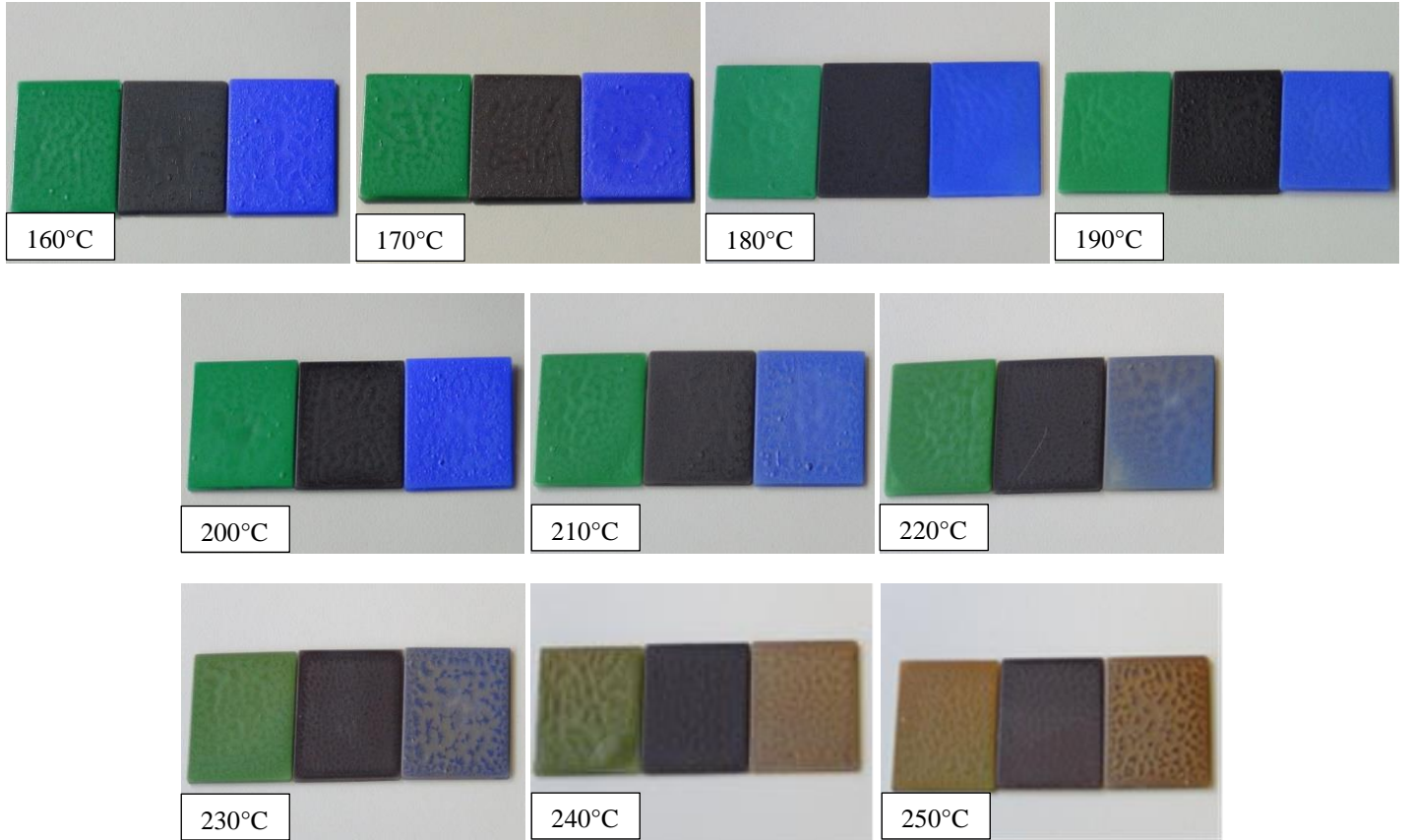
Çalışmada kullanılan polivinilpirolidon (PVP, K 90, ortalama moleküler ağırlık: 360,000, Tokyo Chemical Ind. Co., Ltd.), 2-propanol (Merck, ABD) ve kuvars lameller (Bilim-Med Ltd.) firmalarından temin edilmiştir. Hali Chemical Co., Ltd. firmasının spesifikasyonuna göre üretilen, 33, 45 ve 65°C aktivasyon sıcaklığına sahip yeşil, siyah ve mavi renkli tersinir termokromik pigmentler toz formundadır. Homojen viskozite, sıcaklık kararlılığı, iyi uyumluluk ve çapraz bağlama özellikleri nedeniyle polimer olarak polivinilpirolidon seçilmiştir. Yüzey temizleme işlemleri için kuvars lameller (25 mm x 25 mm) sırasıyla aseton, etanol ve saf suda 10'ar dk.'lık süre ile ultrasonik banyoda temizlenmiştir. Yüzeyleri temizlenen lameller 10 dk. süre ile etüvde kurutulmuştur. Termokromik pigmentlerin polivinilpirolidon içinde daha iyi dispersiyonu için 2-propanol kullanılmıştır. 4 g polivinilpirolidon (bağlayıcı) ve 40 ml 2-propanol (çözücü) ilave edilerek hazırlanan karışım 2 gün bekletilerek kimyasalların birbiri içinde çözünmesi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemden sonra 2 g termokromik pigment ilave edilmiş karışımlar 1 gün daha bekletilerek karışımların yaşlanması sağlanmıştır. Karışım hazırlama prosesi Şekil 1'de verilmektedir. Hazırlanan kaplama karışımları kuvars lameller üzerine rakle ile uygulanmıştır. Kaplamalar tamamen yayıldıktan sonra oda sıcaklığında kurutulmuştur (Şekil 2). Kaplama yüzeylerinin homojenleştirilmesi, stresin giderilmesi ve kaplamanın altlığa tutunmasını sağlamak için farklı sıcaklıklarda ısıl işlemler yapılmıştır (Şekil 3-4). Kaplamaların ısıl işlemi polivinilpirolidon polimerini çapraz bağlamıştır.



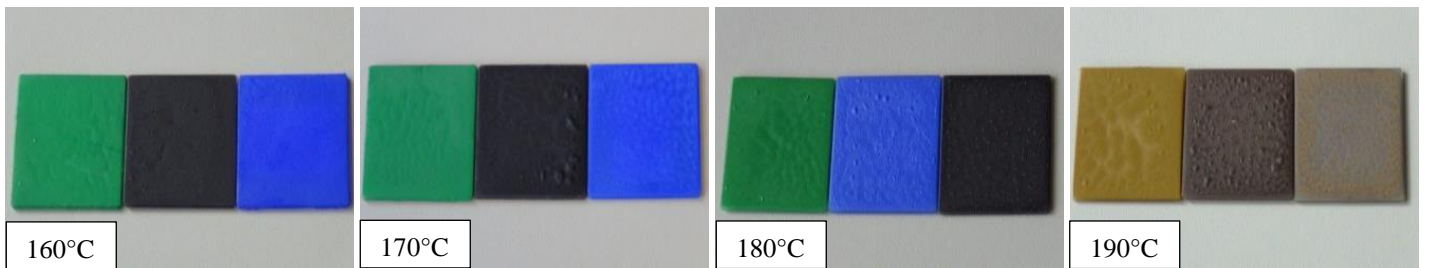
Şekil 1. Kaplama karışımı hazırlama akım şeması



Şekil 2. Yeşil, siyah, mavi pigment ile 1 gün bekletilen ısı işleme tabi tutulmamış numunelerin yüzeyi



Şekil 3. Farklı ısı işlem sıcaklıklarına (160-250°C) tabi tutulmuş kaplamalar (25°C/dk. ısıtma hızında 30 dk. bekleme süresinde)

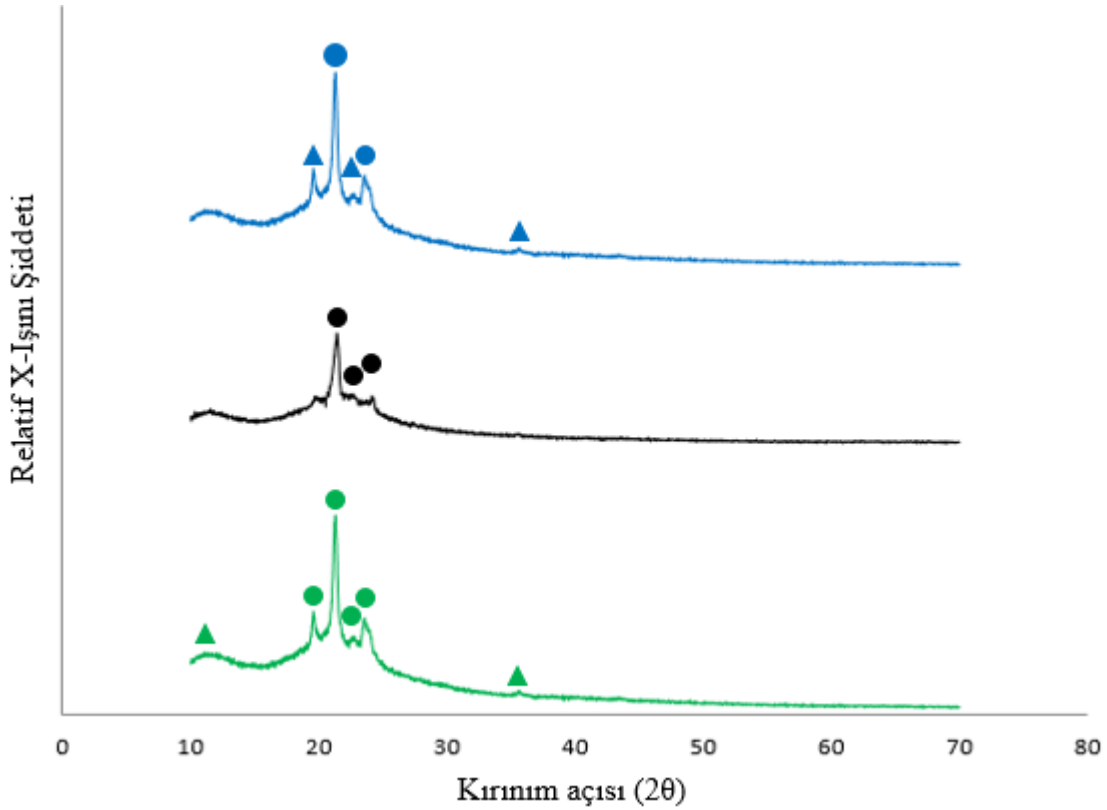


Şekil 4. Farklı vakumlu etüvlerde farklı ısı işlem sıcaklıklarına (160-180°C) tabi tutulmuş kaplamalar (10 dk. bekleme süresinde, 800 mbar vakum altında) ve 190°C'de 3,5 saat bekleme süresinde 600 mmHg vakum altında

3. Bulgular

3.1. X-Işınları Analizi

Termokromik pigmentlerin fazlarının analizi Rigaku MiniFlex 600 marka X-ışınları kırınım cihazı (XRD) ile, Cu tüpüne 40 kV gerilim ve 15 mA akım uygulanarak elde edilen $\text{CuK}\alpha$ ışınımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm ölçümler 10 ve 70 dereceler arasında $1^\circ/\text{dk}$. çekim ve $0,02^\circ$ tarama hızıyla gerçekleştirilmiştir. Kaplanan kuvars lameller metal numune tutuculara sabitlenerek ve incelenen numune ile numune tutucusu aynı düzleme getirilerek analiz işlemi gerçekleştirilmiştir. 160°C 'de ısıl işlem görmüş yeşil, siyah ve mavi termokromik kaplamaların XRD deseni Şekil 5'te verilmiştir. Oluşan fazlar yeşil kaplama için bakır klorür etilendiamin ve metil stearat'tir. Ayrıca yeşil termokromik pigmente yapılan X-ışını difraksiyonu sonuçları da bakır klorür etilendiamin ve metil stearat fazının varlığını doğrulamaktadır. Yapılan bu analizde yeşil renk termokromik pigmentin içeriğinde bakırın bulunduğu tespit edilmiştir. Metil stearat bileşiği sıklıkla, üç bileşenli termokromik pigmentlerde geçiş sıcaklığını tanımlayan çözücü olarak kullanılır (Zhang vd., 2017). Pigment bileşiminin %50'den fazlasını temsil eder. Bu karakteristik piklerin görünümü, metil stearatın, X-ışını kırınım deseninin ölçümü sırasında katı fazda olduğu anlamına gelir. Bu, ölçümlerin, pigment geçiş sıcaklığından daha düşük bir ortam sıcaklığında gerçekleştirilmesi gerçeğiyle tutarlıdır (Pérez vd., 2020). Siyah kaplama için setil alkol, mavi kaplama için setil alkol ve 4-hidroksi-N, N-dimetil- tryptamine fazları tespit edilmiştir.



Şekil 5. 160°C 'de ısıl işlem görmüş yeşil, siyah ve mavi termokromik kaplamanın XRD analizi [● : Metil stearat, ▲ : Bakır klorür etilendiamin, ● : Setil alkol, ● : Setil alkol, ▲ : 4-hidroksi-N, N-dimetil- tryptamine]

3.2. Renk Analizleri

Termokromik kaplamaların renk analizleri Konica Minolta CM 2300D marka spektrofotometre cihazıyla yapılmıştır. Kaplamaların CIE $L^*a^*b^*$ değerleri, kolorimetrik özellikleri karakterize etmek için ölçülmüştür. Bu renk ölçüm sisteminde L^* parametresi, siyah için $L^*=0$, beyaz için $L^*=100$ 'dür ve rengin açık veya koyuluğunu ifade eder. a^* yeşil(-)/kırmızı(+) eksen iken b^* mavi(-)/sarı(+) eksenidir. $L^* a^* b^*$ değerleri elde edildikten sonra, toplam renk farkı ΔE^* aşağıdaki formüle göre hesaplanabilir:

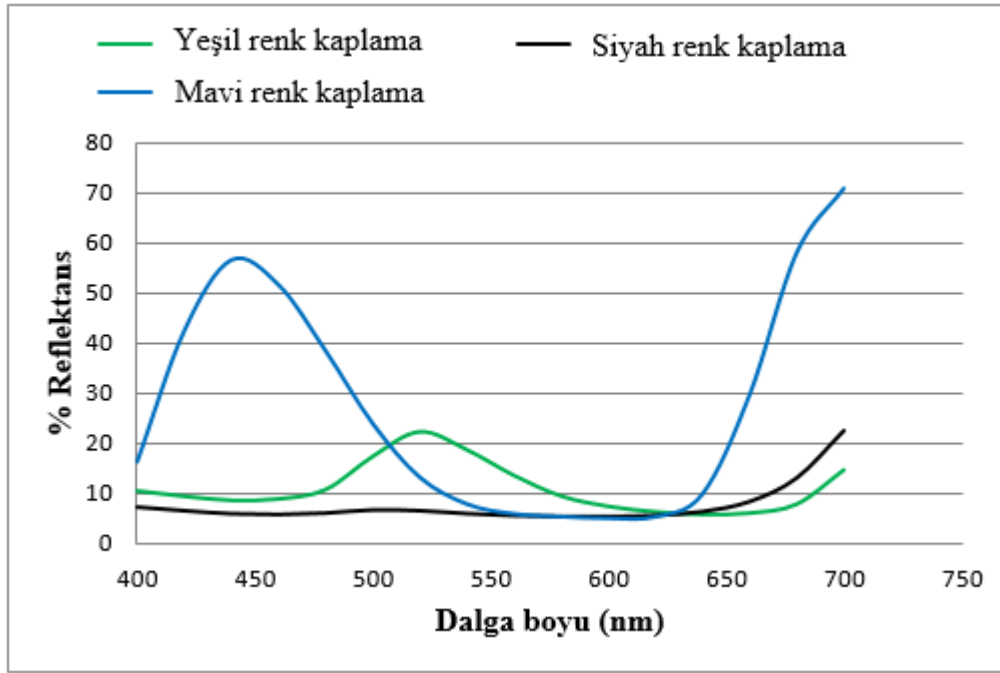
$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

Tablo 1'de spektrofotometre cihazından elde edilen sonuçlar, Şekil 6'da ise kaplamaların reflektans spektrumu gösterilmektedir. İnsan gözü 380 nm ile 780 nm arasındaki dalga boylarını algılayabilir, bu nedenle elektromanyetik spektrumun bu bölümüne görünür ışık denir. Yeşil ışık, elektromanyetik spektrumun yaklaşık 510 nm'lik dalga boyuna sahip aralığına denk gelen kısımdır. Tüm dalga boyları

birden aynı anda gözümüze ulaşırsa bunu beyaz, hiç ışık ulaşmazsa siyah olarak algılarız. Mavi ışığın dalga boyu ise 380-500 nm arasındadır.

Tablo 1. 33°C yeşil, 45°C siyah ve 65°C mavi renk kaplamaların renk değerleri

Numune Adı	L*	a*	b*	ΔE^*_{ab}
33°C yeşil renk kaplama	43,80	-27,69	11,47	23,59
45°C siyah renk kaplama	28,71	-1,17	-0,51	14,95
65°C mavi renk kaplama	42,04	18,05	-56,53	11,41



Şekil 6. Kaplamaların reflektans spektrumu

3.3. Renk Değişiminin Sıcaklığa Bağlı Analizi

Oluşturulan kaplamaların renk değişim sıcaklığı kızılötesi termometre (GM320) ile tespit edilmiştir. Renk değiştirme sıcaklıkları gözle renk değişimi gözlemlenerek belirlenmiştir. Numune bir taraftan hot plate'ten ısı alırken diğer taraftan yüzeyden ısı kaybeder. Kızılötesi termometre lazerle noktasal ölçüm yapmaktadır. Bu yüzden numunenin orta kısmında sıcaklıklar yüksek çıkarken numunenin kenarındaki sıcaklıklar düşük çıkmıştır. Oluşturulan kaplamaların + ve - standart sapması verilen değerler arasındadır. Yüzey sıcaklığı 33°C'nin üzerine çıktığında, termokromik kaplama sıcaklığının artması nedeniyle rengi yeşilden beyaza değiştirmeye başlamıştır. Şekil 7.'de gösterildiği üzere yüzey sıcaklığı 40°C olduğunda ise kaplama rengi beyaza dönmüştür. Yeşil termokromik kaplama soğuturken 33°C'de tekrar yeşil renge dönmeye başlamıştır (Şekil 8). Siyah termokromik kaplama ısıtırken ve soğuturken 40°C'de renk değiştirmeye başlamıştır (Şekil 9-10). Mavi termokromik kaplama ısıtırken 55°C'de renk değiştirmeye başlayıp, yüzey sıcaklığı 60°C'ye ulaştığında tamamen beyaz renge dönmüştür (Şekil 11). Soğuturken mavi termokromik kaplama 55°C'de renk değiştirmeye başlamıştır (Şekil 12). Isı ile renk geçişi işlemiyle tüm numunelerde renk değişimi belirgindir. Termokromik pigment kullanılarak oluşturulan kaplamalar, termokromik özellik göstererek sıcaklıkla birlikte renk değiştirme özelliğine sahiptir. Geçiş sıcaklıklarından yüksek sıcaklıklar için, malzeme yüksek yansıtma ile ilişkili açık renk gösterirken, daha düşük sıcaklıklar için düşük yansıtma ile ilişkili koyu renk gösterir. Aktivasyon sıcaklığı 33, 45 ve 65°C'de olan üç ticari tersinir termokromik pigmentle yapılan kaplamaların sıcaklığın fonksiyonu olarak renk değişimi değerlendirilmiştir. Oluşturulan kaplamalar, dikkate değer geri dönüşümlü termokromik renk değişimi sergilemiştir.



Şekil 7. Yeşil renk termokromik kaplamanın artan sıcaklıkla renk değişimi



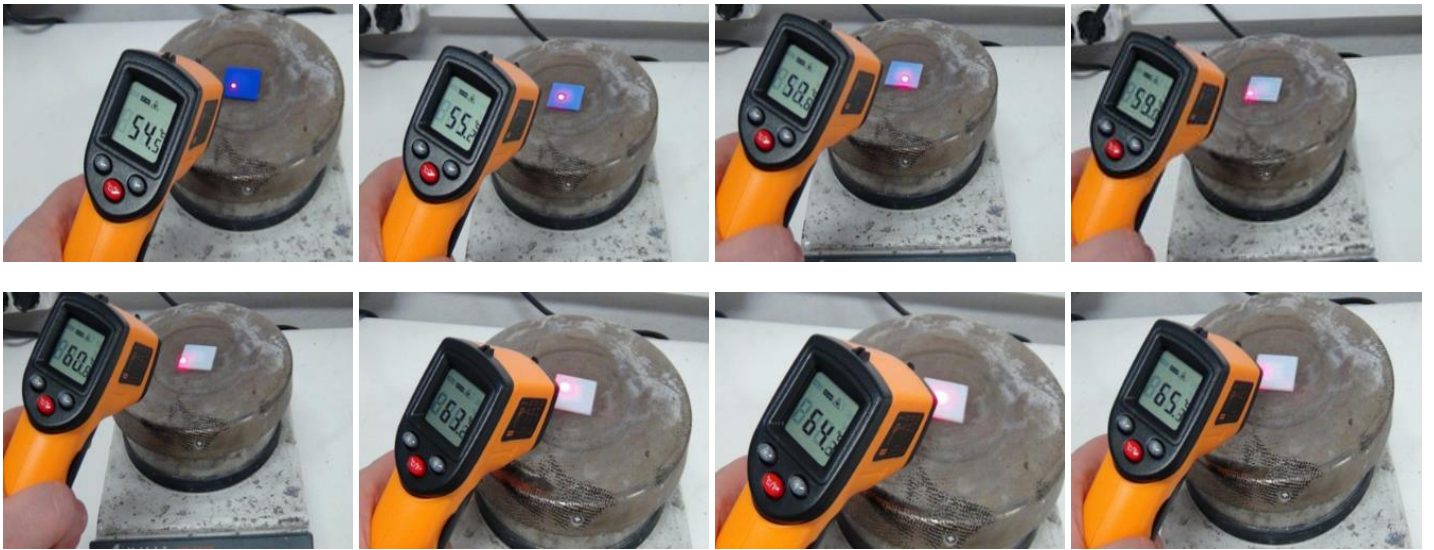
Şekil 8. Yeşil renk termokromik kaplamanın azalan sıcaklıkla renk değişimi



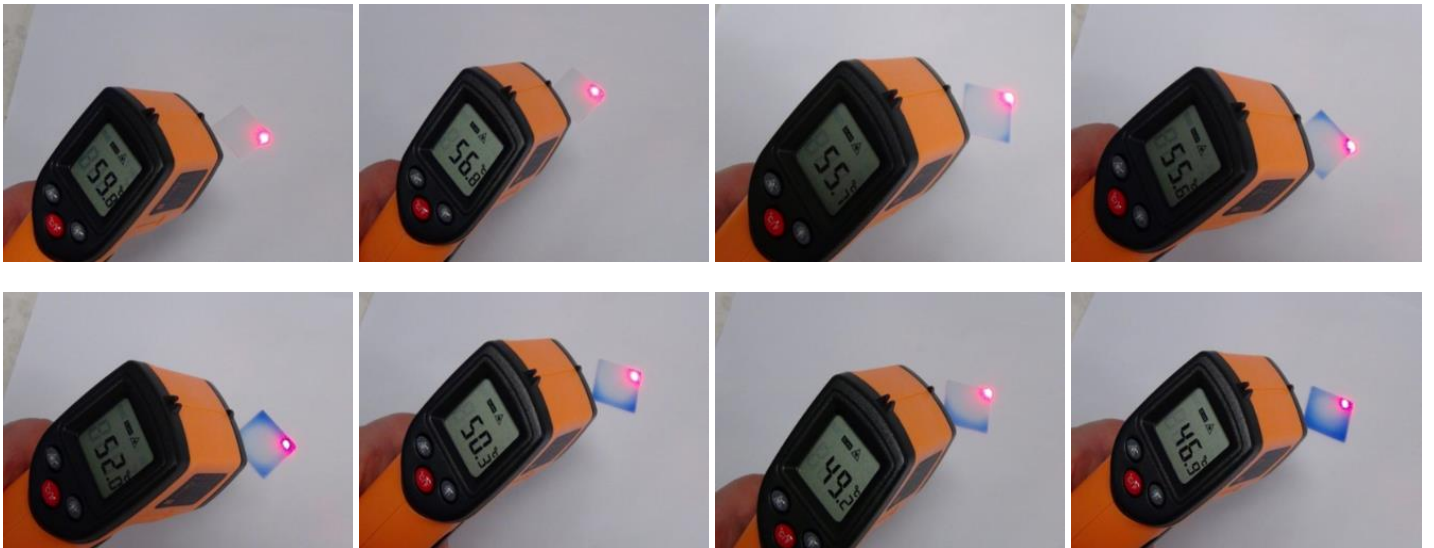
Şekil 9. Siyah renk termokromik kaplamanın artan sıcaklıkla renk değişimi



Şekil 10. Siyah renk termokromik kaplamanın azalan sıcaklıkla renk değişimi



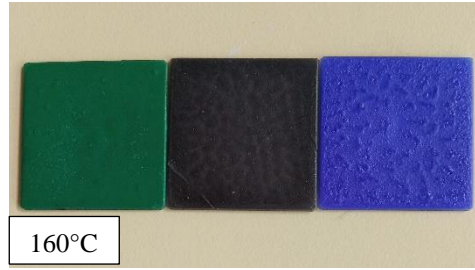
Şekil 11. Mavi renk termokromik kaplamanın artan sıcaklıkla renk değişimi



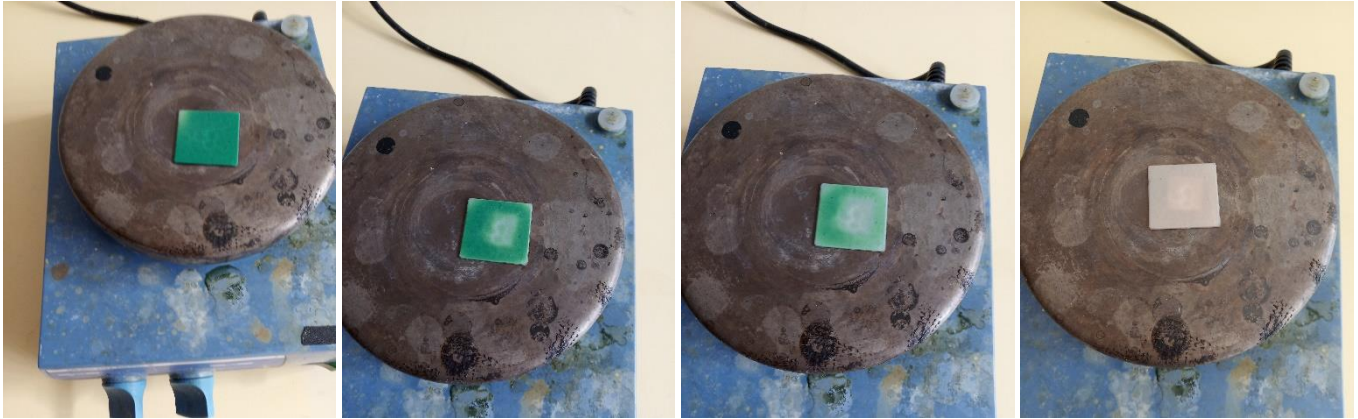
Şekil 12. Mavi renk termokromik kaplamanın azalan sıcaklıkla renk değişim

3.4. 30 Ay Sonra Kaplamaların Termokromik Performansının Değerlendirilmesi

Farklı ısı işlem sıcaklıklarına tabi tutulmuş tüm kaplamalar yapılarından 30 ay sonra tekrar incelendiğinde renklerinin oluşturulduğu şekilde bozulmadan durduğu görülmüştür. Şekil 13'te yapılarından 30 ay geçen 160°C'de ısı işlem sıcaklığına tabi tutulmuş kaplamalar gösterilmektedir. Bu kaplamaların ısı özellikleri tekrar incelendiğinde uzun süre ısıtılıp soğutulan numunelerin geri dönüşümlü termokromik performansa sahip olduğu belirlenmiştir. Şekil 14-16, 30 ay sonra ısıtırken numunelerin renk değişimini göstermektedir. T-02D marka kızılötesi termal kamera ile de kaplamaların ısı özellikleri incelenmiştir (Şekil 17). Kızılötesi termal kamera görüntülerinden yeşil numunenin ısıtırken 40,2°C'de, mavi numunenin ise ısıtırken 60°C'de beyaz renkte olduğu görülmüştür. Ayrıca kızılötesi termal kamera ile yapılan incelemede ısıtırken siyah termokromik kaplamanın 40,5°C'te renk değiştirmeye başladığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar önceden yapılan kızılötesi termometre ısı incelemeleriyle de uyumludur. Geçen bu uzun süre sonucunda numunelerin termokromik performansında bir değişim görülmemiştir. Numuneler uzun süre ısıtma ve soğutma çevrimine tabi tutulduğunda bile ısıtıldığında beyaz renge soğutulduğunda ise kendi rengine geri dönmüştür.



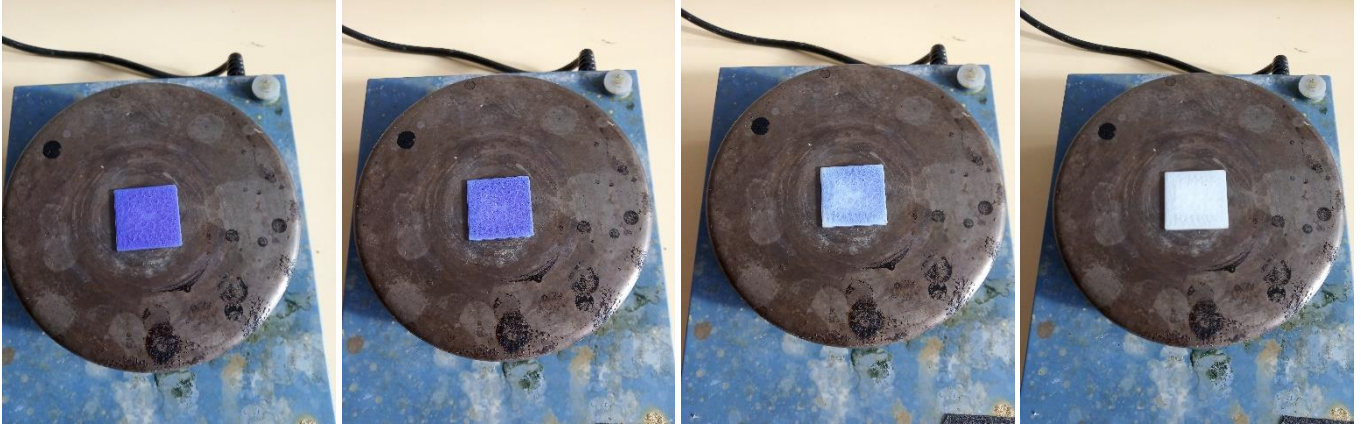
Şekil 13. Yapısından 30 ay geçen 160°C'de ısı işlem sıcaklığına tabi tutulmuş kaplamalar (25°C/dk. ısıtma hızında 30 dk. bekleme süresinde)



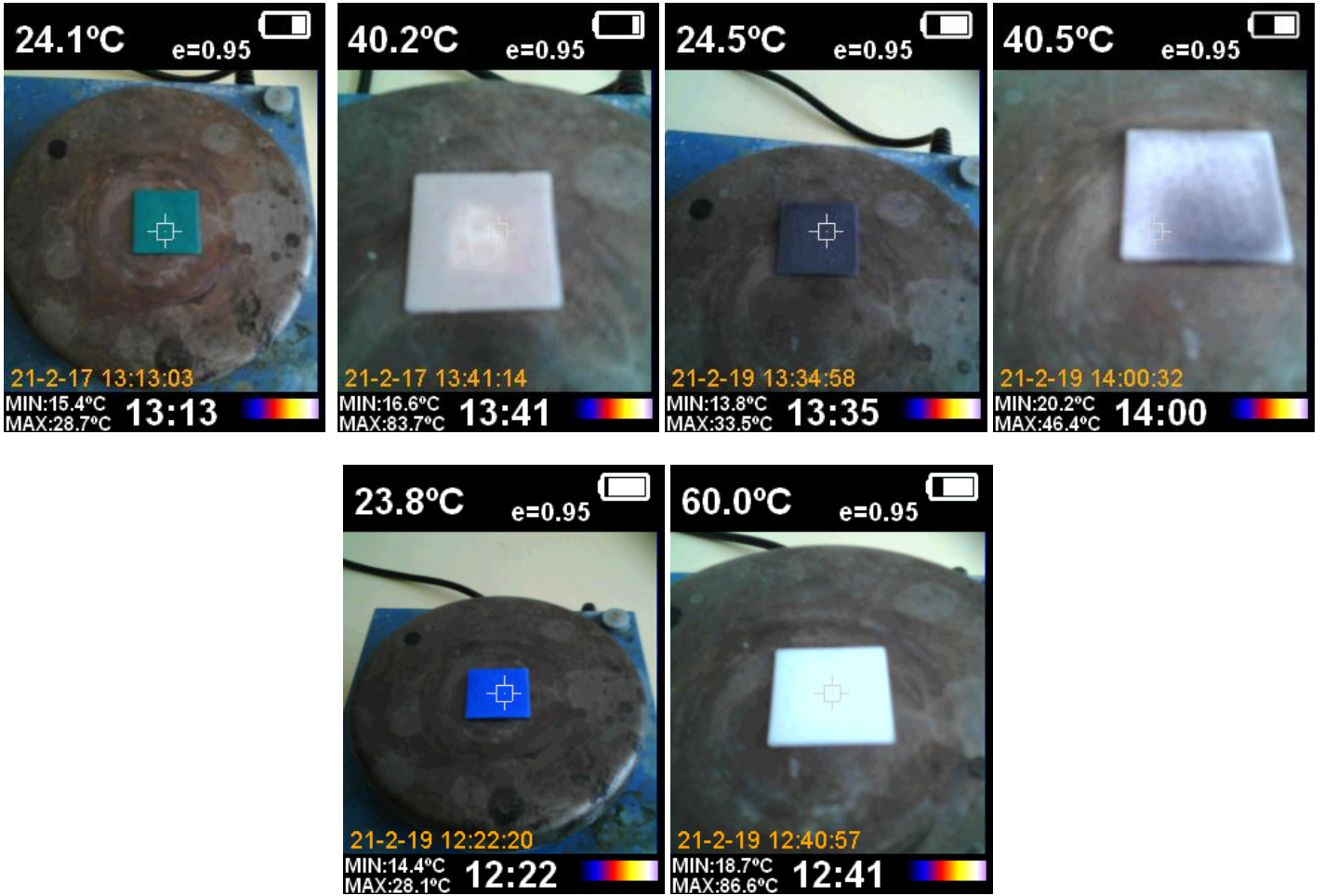
Şekil 14. 30 ay sonra ısıtırken yeşil renk numunenin renk değişimi



Şekil 15. 30 ay sonra ısıtırken siyah renk numunenin renk değişimi



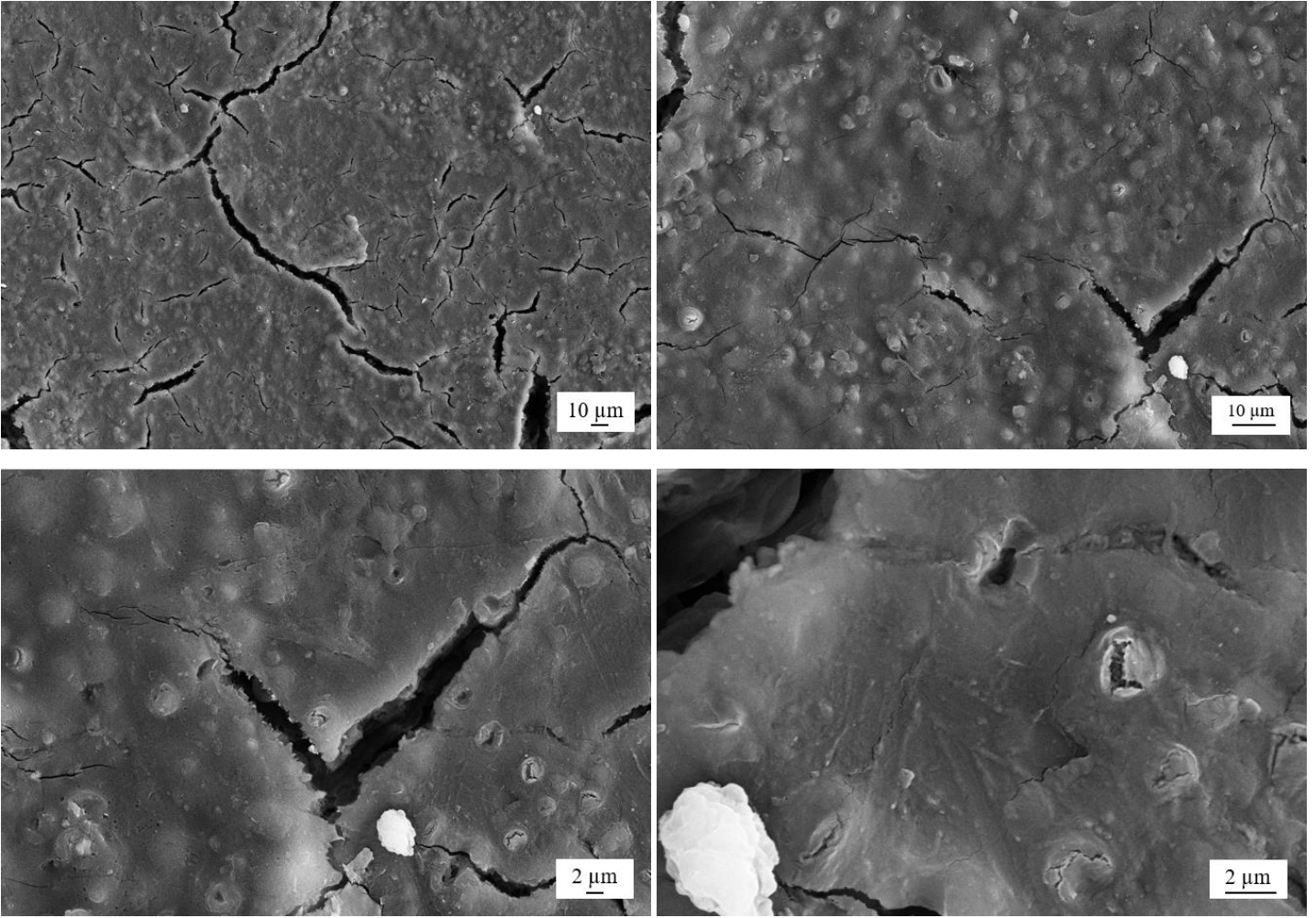
Şekil 16. 30 ay sonra ısıtırken mavi renk numunenin renk değişim



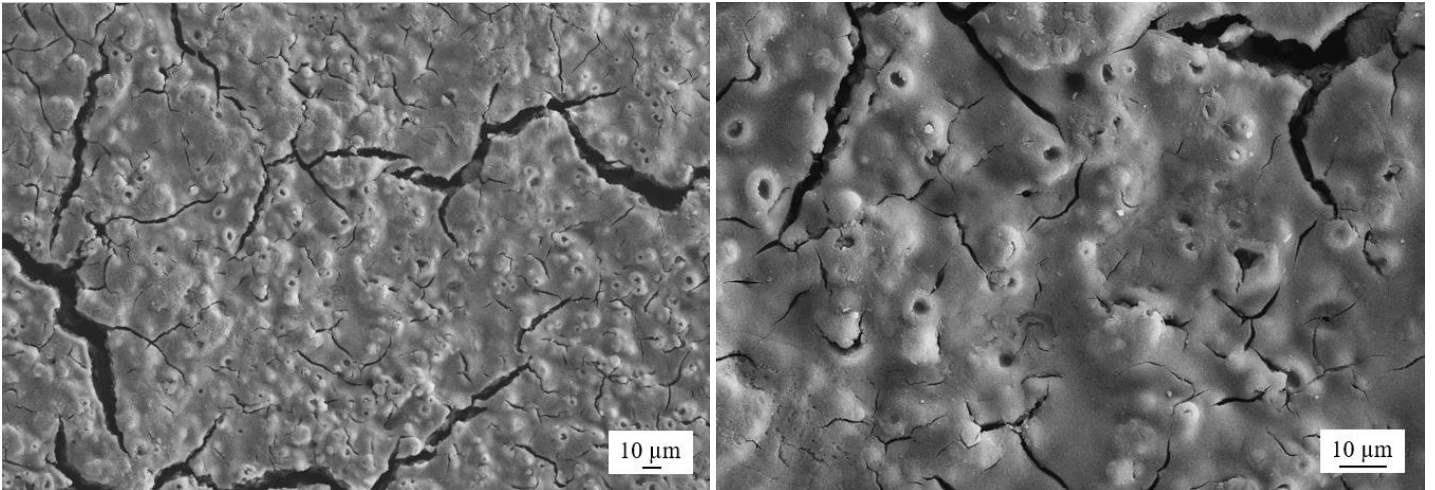
Şekil 17. 160°C'de ısıl işlem sıcaklığına tabi tutulmuş yeşil, siyah ve mavi kaplamaların kızılötesi termal kamera ile incelenmesi

3.5. SEM Analizleri

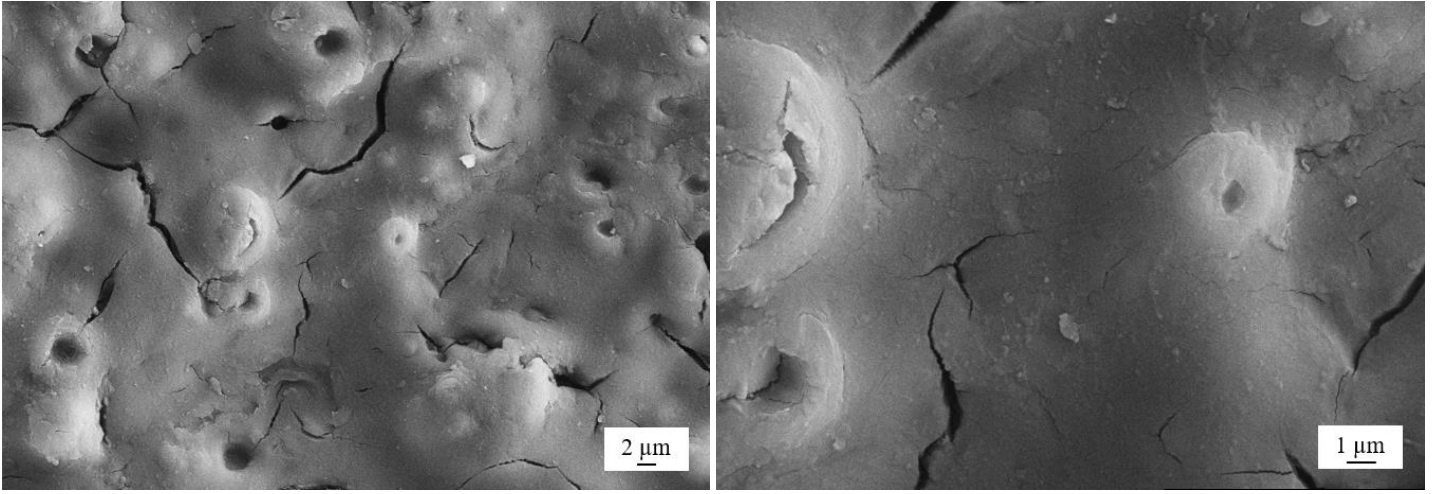
Şarjlanma olmadan iletkenliği sağlamak için belirli süre altın kaplama yapılan numuneler Zeiss marka Supra 50 VP model SEM kullanılarak mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 18-20, ısıl işlem sonrası termokromik kaplamaların morfolojik değişimlerini göstermektedir. Isıl işlem sıcaklığı 180°C olan yeşil, siyah ve mavi kaplamalarda çatlakların olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca kuvars lamellerin kaplanan yüzeyinde gaz çıkışı olduğundan kabarcıklar oluşmuştur. 180°C'de 30 dk. ısıl işlem gören numunelerin yüzeyindeki gaz çıkışı artarak krater görümlü yüzeylere neden olmuştur. Oluşturulan tüm kaplamaların mikro yapısında pigment mikrokapsülleriyle ilişkili küresel yapılar veya küre parçaları bulunmaktadır. Öte yandan, küresel yapılar, kaplamaların içinde homojen yayılma sergilemiştir.



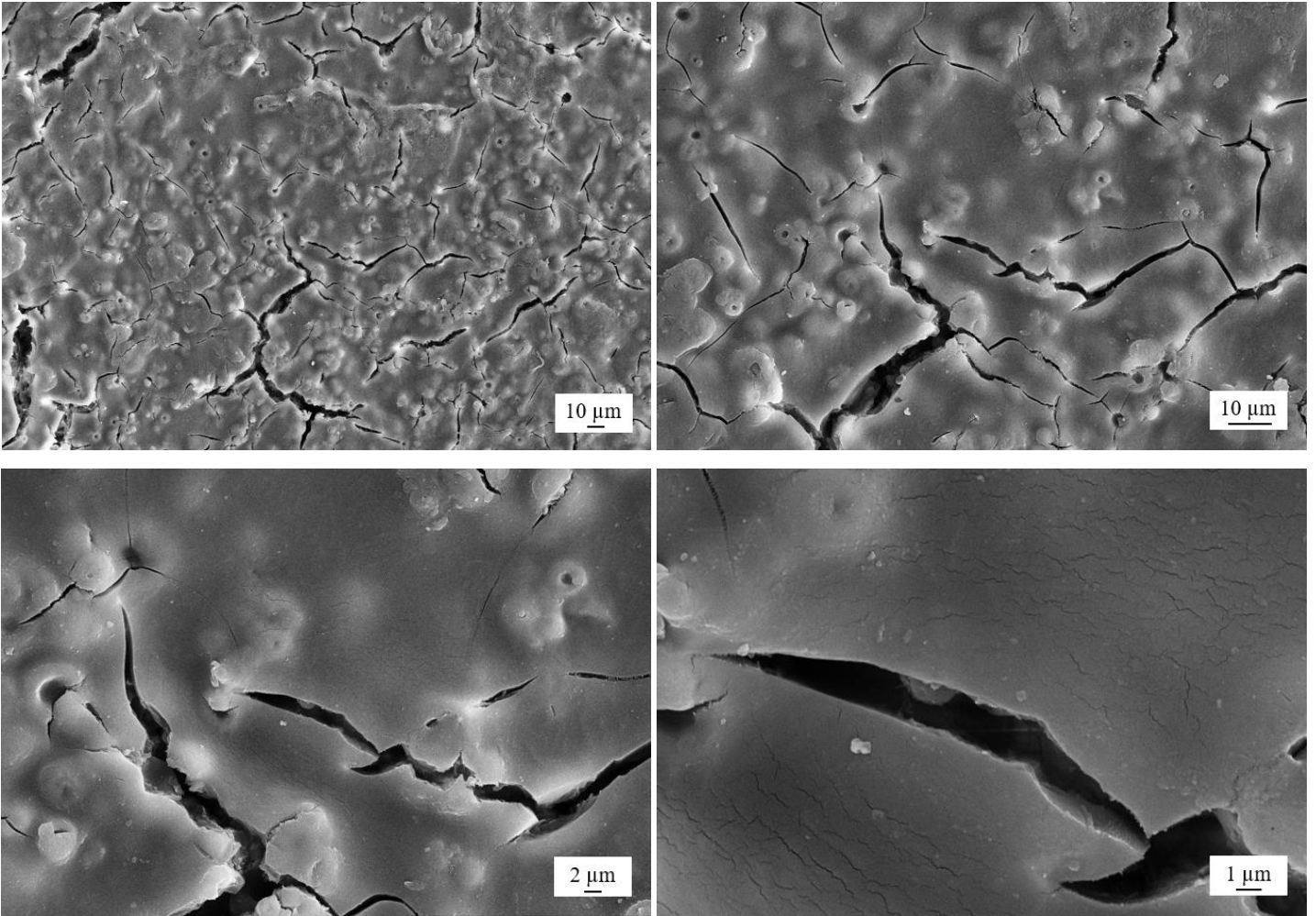
Şekil 18. 180°C'de 30 dk. ısıt işlem sonrasında yeşil pigmentli termokromik kaplamaların SEM görüntüleri



Şekil 19. 180°C'de 30 dk. ısıt işlem sonrasında siyah pigmentli termokromik kaplamaların SEM görüntüleri



Şekil 19 (devam). 180°C’de 30 dk. ısıt işlemler sonrasında siyah pigmentli termokromik kaplamaların SEM görüntüleri

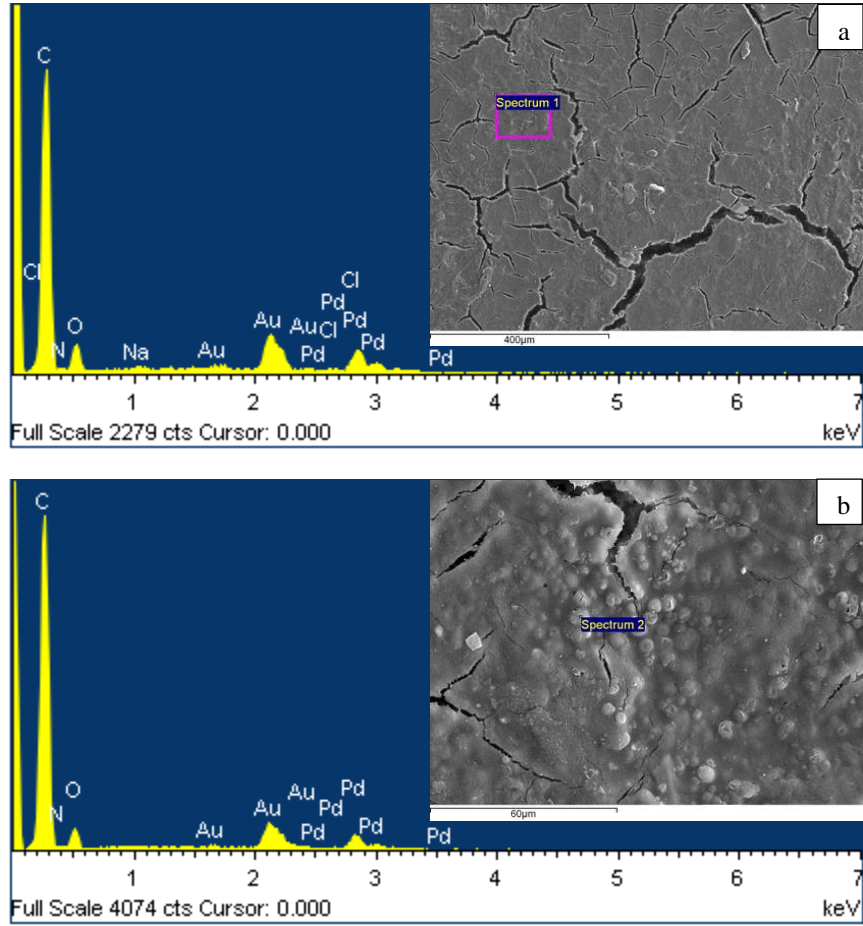


Şekil 20. 180°C’de 30 dk. ısıt işlemler sonrasında mavi pigmentli termokromik kaplamaların SEM görüntüleri

3.6. EDX Analizleri

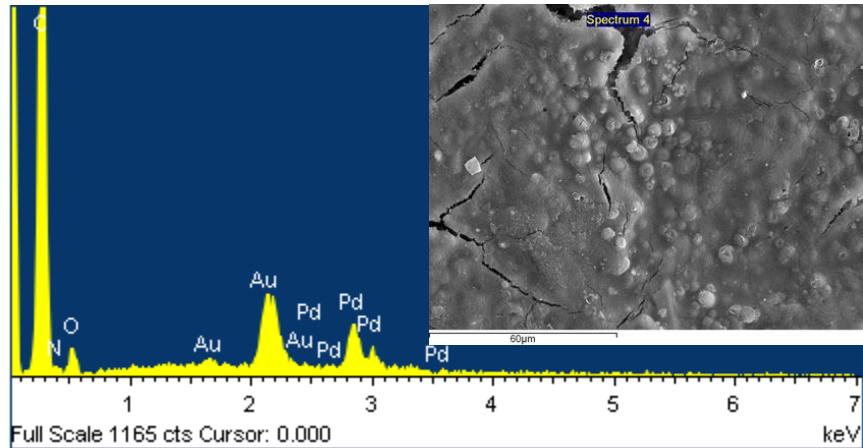
Enerji saçınımlı X-ışını (EDX) cihazı kullanılarak termokromik kaplamaların elementel analizleri tespit edilmiştir. 180°C’de ısıt işleme tabi tutulduktan sonra termokromik kaplamaların üzerindeki elementlerin EDX görüntüleri Şekil 21-24’te gösterilmektedir. Yahtkan numunelere, SEM karakterizasyonundan önce altın paladyum kaplama yapıldığı için, spektruma Au ve Pd pikleri de dahil edilmiştir. Enerji yayımlı X-ışını analizleri (EDX) kaplamaların ana bileşimini ortaya koymaktadır. EDX analitik bir teknik olup,

karakterizasyon X-ışını uyarımı kaynağın ve numunenin etkileşimine dayanır. Alınan görüntüde spektrum 1 olarak belirlenmiş bölüme EDX analizi yapılmıştır. Şekil 21(a)'da gösterilen EDX ile yapılan elementel analiz sonucunda % 28,05 C, % 3,64 N, % 0,15 Na, % 0,13 Cl, % 0,66 Pd, % 0,57 Au ve % 66,79 O belirlenmiştir. Numunenin spektrum 2 olarak belirlenmiş bölüme yapılan elementel analizinde % 28,19 C, % 3,85 N, % 0,48 Pd, % 0,39 Au ve % 67,08 O olarak tespit edilmiştir (Şekil 21(b)).



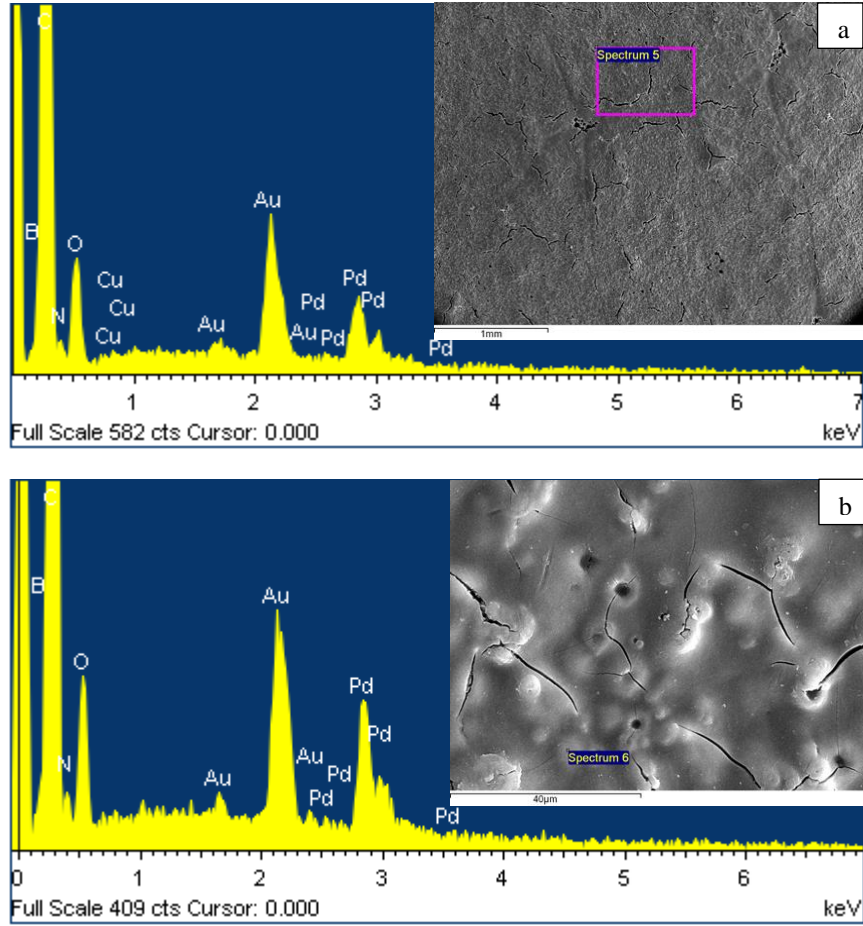
Şekil 21. (a) 180°C'de 30 dk. ısıt işlem gören yeşil kaplamanın spektrum 1 olarak belirlenmiş bölüme yapılan EDX analizi **(b)** Spektrum 2 olarak belirlenmiş bölüme yapılan EDX analizi

Elde edilen görüntüde Spektrum 4 olarak belirlenmiş bölüme yapılan EDX analizinde % 25,87 C, % 5,30 N, % 0,97 Pd, % 0,75 Au, % 67,10 O belirlenmiştir (Şekil 22).



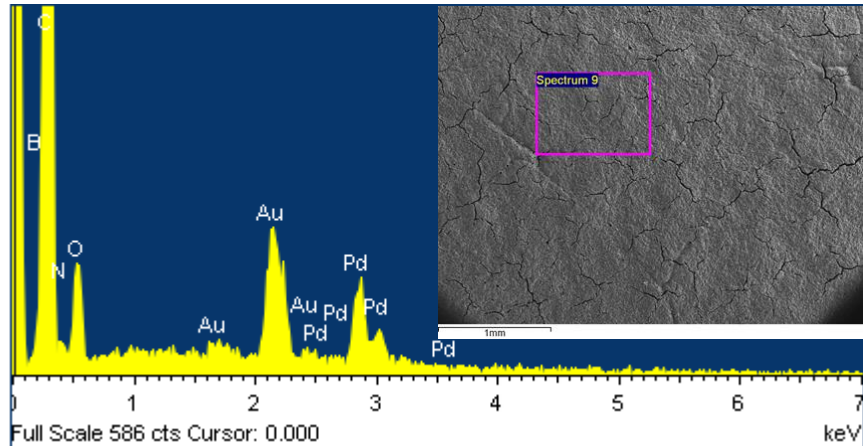
Şekil 22. 180°C'de 30 dk. ısıt işlem gören yeşil kaplamanın spektrum 4 olarak belirlenmiş bölüme yapılan EDX analizi

Mavi ve siyah kaplamalarda yapılan EDX analizleri incelemeleri sonucunda bor oksit (B_2O_3) varlığı tespit edilmiştir. Şekil 23(a)'da alınan görüntüde pembe dikdörtgen olarak belirlenmiş bölüme yapılan EDX analizinde % 6,51 B, % 24,31 C, % 2,72 N, % 0,28 Pd, % 0,28 Au, % 65,90 O belirlenmiştir. Spektrum 6 olarak belirlenmiş bölüme yapılan EDX analizinde % 7,65 B, % 23,41 C, % 2,68 N, % 0,30 Pd, % 0,26 Au, % 65,69 O belirlenmiştir (Şekil 23(b)).



Şekil 23. (a) 180°C'de 30 dk. ısıtılmış mavi kaplamanın spektrum 5 olarak belirlenmiş bölüme yapılan EDX analizi (b) Spektrum 6 olarak belirlenmiş bölüme yapılan EDX analizi

Şekil 24'deki Spektrum 9 olarak belirtilen bölgenin EDX analizinde % 7,07 B, % 23,69 C, % 2,71 N, % 0,42 Pd, % 0,37 Au, % 65,74 O tespit edilmiştir. Siyah kaplamaya yapılan diğer bir EDX analizinde % 7,38 B, % 22,76 C, % 3,26 N, % 0,48 Pd, % 0,37 Au, % 65,76 O belirlenmiştir. Oluşturulan tüm kaplamalar esas olarak karbon ve oksijenden oluşur ve bu da organik bileşik yapısını işaret eder.



Şekil 24. 180°C'de 30 dk. ısıtılmış siyah kaplamanın spektrum 9 olarak belirlenmiş bölüme yapılan EDX analizi

4. Tartışma ve Sonuç

Termokromik kaplamalar, binalar ve çevre arasında akıllı etkileşim sağlayabilir ve kentsel termal ortamı iyileştirebilir. Termokromik malzemeler, hem ısıtma hem de soğutma dönemlerinde bina enerji tüketimini azaltma potansiyeline sahiptir. Termokromik kaplamalar temel olarak görünür banttaki yansıma değişimiyle güneş radyasyonunun soğurma kabiliyetini düzenler (Zhang & Zhai, 2019). Bu çalışmada organik mikrokapsüllenmiş termokromik pigmentlere dayalı akıllı tersinir termokromik kaplamalar sunulmuştur. Sıcaklıkla tersine değişen optik özelliklere sahip kapsüllenmiş tersinir termokromik pigmentler oluşturulan kaplamalarda kullanılmıştır. Burada oluşturulan kompozisyonda termokromik pigmentlere ısıyla çapraz bağlanabilen polivinilpirolidon ve çözücü olarak 2-propanol dahil edilmiştir. Sıcaklığa göre yeşil, siyah, mavi ile beyaz arasında renk değiştiren akıllı kaplama elde etmek için kuvars lamel üzerine rakle ile kaplama uygulanmıştır. Termokromik kaplamaların renklendirme ve beyaz renge dönme etkisi araştırılmıştır. Termokromik pigmentlerle oluşturulan kaplamaların XRD, SEM-EDX, renk analizleri yapılmış renk değişim sıcaklıkları tespit edilmiştir. Yeşil, siyah ve mavi olmak üzere üç farklı renkteki kaplamalar uygun bir bağlayıcı sisteme termokromik pigmentler eklenerek oluşturulmuştur. Oluşturulan kaplamalar yeşilden beyaza beyazdan yeşile, siyahtan beyaza beyazdan siyaha, maviden beyaza beyazdan maviye tersinir şekilde renk değişikliği göstermektedir. Polivinilpirolidonun eklenmesi kaplama kalınlığını arttırmıştır. Mikro yapı çalışmalarında oluşturulan tüm kaplamalarda çatlak ve krater görünümlü yapılar belirlenmiştir. İyi dağılmış termokromik pigmentlere sahip kaplamaların rengi, sıcaklık değişimine hızlı tepki göstermiştir ve bu da tek tip renk dönüşümüyle sonuçlanmıştır. Sonuç olarak oluşturulan tüm kaplamalar geri dönüşümlü renk tersinirliği sergilemiştir. Geliştirilen bukalemun tipi bina kaplamaları, enerji tüketimi sorunlarını çözmek, termal olarak rahat bir ortam oluşturmak amacıyla bina iç dekorasyon malzemesi olarak kullanılabilir. Bu akıllı tersinir termokromik kaplamanın geliştirilmesinde gelecekteki çalışmalar, dış bina kaplaması olarak uygulanmasıyla ilgili dayanıklılık sorunlarına yönelik olmalıdır.

Referanslar

- Aklujkar, P. S., & Kandasubramanian, B. (2020). A review of microencapsulated thermochromic coatings for sustainable building applications. *Journal of Coatings Technology and Research*, 1-19. doi:org/10.1007/s11998-020-00396-3
- Berardi, U., Garai, M., & Morselli, T. (2020). Preparation and assessment of the potential energy savings of thermochromic and cool coatings considering inter-building effects. *Solar Energy*, 209, 493-504. doi:org/10.1016/j.solener.2020.09.015
- Calovi, M., Russo, F., & Rossi, S. (2021). Synergic behavior of graphene-based filler and thermochromic pigments in cataphoretic coatings. *Progress in Organic Coatings*, 150, 105978. doi:org/10.1016/j.porgcoat.2020.105978
- Chen, Y.-Y., & Wei, W.-C. J. (2001). Formation of mullite thin film via a sol-gel process with polyvinylpyrrolidone additive. *Journal of the European Ceramic Society*, 21(14), 2535-2540. doi:org/10.1016/S0955-2219(01)00277-1
- Cheng, Y., Zhang, X., Fang, C., Chen, J., & Wang, Z. (2018). Discoloration mechanism, structures and recent applications of thermochromic materials via different methods: A review. *Journal of Materials Science & Technology*, 34(12), 2225-2234. doi:org/10.1016/j.jmst.2018.05.016
- Ferrara, M., & Bengisu, M. (2014). *Materials that change color: smart materials, intelligent design* (pp. 9-60). Springer. doi: 10.1007/978-3-319-00290-3
- Garshasbi, S., & Santamouris, M. (2019). Using advanced thermochromic technologies in the built environment: Recent development and potential to decrease the energy consumption and fight urban overheating. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 191, 21-32. doi:org/10.1016/j.solmat.2018.10.023
- Hu, J., & Yu, X. B. (2019). Adaptive thermochromic roof system: Assessment of performance under different climates. *Energy and Buildings*, 192, 1-14. doi:org/10.1016/j.enbuild.2019.02.040
- Hu, J., & Yu, X. B. (2020). Adaptive building roof by coupling thermochromic material and phase change material: Energy performance under different climate conditions. *Construction and Building Materials*, 262, 120481. doi:org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120481
- Karlessi, T., & Santamouris, M. (2015). Improving the performance of thermochromic coatings with the use of UV and optical filters tested under accelerated aging conditions. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 10(1), 45-61. doi:org/10.1093/ijlct/ctt027
- Karlessi, T., Santamouris, M., Apostolakis, K., Synnefa, A., & Livada, I. (2009). Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures. *Solar Energy*, 83(4), 538-551. doi:org/10.1016/j.solener.2008.10.005

- Kuźmińska, A., Butruk-Raszeja, B. A., Stefanowska, A., & Ciach, T. (2020). Polyvinylpyrrolidone (PVP) hydrogel coating for cylindrical polyurethane scaffolds. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 192, 111066. doi:org/10.1016/j.colsurfb.2020.111066
- Pedaballi, S., Li, C.-C., & Song, Y.-J. (2019). Dispersion of microcapsules for the improved thermochromic performance of smart coatings. *RSC advances*, 9(42), 24175-24183. doi: 10.1039/c9ra04740a
- Pérez, G., Allegro, V. R., Corroto, M., Pons, A., & Guerrero, A. (2018). Smart reversible thermochromic mortar for improvement of energy efficiency in buildings. *Construction and Building Materials*, 186, 884-891. doi:org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.246
- Pérez, G., Mota-Heredia, C., Sánchez-García, J., & Guerrero, A. (2020). Compatibility between thermochromic pigments and Portland cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 251, 119038. doi:org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119038
- Rajadurai, R. S., Lee, J.-H., Choi, E., & Kang, J.-W. (2020). MnNH4P2O7-Based Coating for High Temperature Assessment on the Surfaces of Cement Composites. *Coatings*, 10(4), 396. doi:org/10.3390/coatings10040396
- Rossi, S., Simeoni, M., & Quaranta, A. (2021). Behavior of chromogenic pigments and influence of binder in organic smart coatings. *Dyes and Pigments*, 184, 108879. doi:org/10.1016/j.dyepig.2020.108879
- Santamouris, M., Synnefa, A., & Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, 85(12), 3085-3102. doi:org/10.1016/j.solener.2010.12.023
- Štaffová, M., Kučera, F., Tocháček, J., Dzik, P., Ondreáš, F., & Jančář, J. (2021). Insight into color change of reversible thermochromic systems and their incorporation into textile coating. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(4), 49724. doi:org/10.1002/app.49724
- Yan, X., Chang, Y., & Qian, X. (2019). Effect of the concentration of pigment slurry on the film performances of waterborne wood coatings. *Coatings*, 9(10), 635. doi:org/10.3390/coatings9100635
- Yan, X., Wang, L., & Qian, X. (2020). Effect of coating process on performance of reversible thermochromic waterborne coatings for Chinese fir. *Coatings*, 10(3), 223. doi:org/10.3390/coatings10030223
- Yuxuan, Z., Yunyun, Z., Jianrong, Y., & Xiaoqiang, Z. (2020). Energy saving performance of thermochromic coatings with different colors for buildings. *Energy and Buildings*, 215, 109920. doi:org/10.1016/j.enbuild.2020.109920
- Zhang, H., Chen, Z., Li, L., & Zhu, C. (2017). Evaluation of aging behaviors of asphalt with different thermochromic powders. *Construction and Building Materials*, 155, 1198-1205. doi:org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.161
- Zhang, Y., & Zhai, X. (2019). Preparation and testing of thermochromic coatings for buildings. *Solar Energy*, 191, 540-548. doi:org/10.1016/j.solener.2019.09.042



OFDM-AIM İletim Tekniği için Karınca Kolonisi Optimizasyon Algoritması Tabanlı Alt-Blok Set Tasarımı

Ant Colony Optimization Algorithm Based Sub-Blocks Set Design for OFDM-AIM Transmission Technique

Mahmut Yıldırım¹

¹Bozok Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 66900 Yozgat, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 12/01/2021

Kabul / Accepted: 18/03/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 27/05/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

OFDM-IM (İndeks Modülasyonlu Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama), 5G (Beşinci Nesil) ötesi iletişim sistemleri için aday iletim tekniklerinden birisi olarak son yıllarda üzerinde birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. OFDM-IM'nin spektral verimliliğinin artırılması amacıyla geliştirilen OFDM-AIM (Tüm İndeks Modülasyonlu OFDM) tekniğinde, boş alt-taşıyıcıların bulunduğu OFDM-IM'den farklı olarak tüm alt-taşıyıcılar aktif duruma getirilmiştir. Bu makalede, OFDM-AIM'in bit hata oranı (BHO) performansının iyileştirilmesi için Karınca Kolonisi Optimizasyonu (KKO) algoritması tabanlı bir alt-blok set tasarımı önerilmiştir (KKO-OFDM-AIM). OFDM-AIM tekniğinde veri bitleri, PSK/QAM takımyıldızı noktaları ile eşleştirilirken önerilen KKO-OFDM-AIM tekniğinde, çeşitlilik kazancının artırılması amacıyla PSK/QAM takımyıldızı uzayının tamamı olası eşleştirme noktaları olarak değerlendirilir. KKO-OFDM-AIM tekniğinde, en yüksek uygunluk değerine sahip eşleştirme noktaları KKO algoritması tarafından belirlenerek alt-blok seti oluşturulur. Simülasyon çalışmalarında KKO-OFDM-AIM tekniği, OFDM, OFDM-IM, OFDM-AIM ve GA-OFDM-AIM (Genetik algoritma tabanlı OFDM-AIM) teknikleri ile karşılaştırılmış ve en iyi BHO başarısına sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

“5G, OFDM-IM, OFDM-AIM, Karınca Kolonisi Optimizasyonu”

Abstract

OFDM-IM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Index Modulation) as one of the candidate transmission techniques for communication systems beyond 5G (Fifth Generation), many studies have been carried out in recent years. In the OFDM-AIM (OFDM with All Index Modulation) technique, which has developed to increase the spectral efficiency of the OFDM-IM, unlike the OFDM-IM which has empty sub-carriers, all sub-carriers are activated. In this article, Ant Colony Optimization (ACO) algorithm based sub-block set design (ACO-OFDM-AIM) is proposed to improve bit error rate (BER) performance of the OFDM-AIM. In the OFDM-AIM technique, data bits are matched with PSK/QAM constellation points, while in the KKO-OFDM-AIM technique, the entire PSK/QAM constellation space can be determined as possible mapping points in order to increase diversity gain. In the ACO-OFDM-AIM technique, the matching points with the highest fitness value are determined by the ACO algorithm and a sub-block set is created. In simulation studies, the ACO-OFDM-AIM technique is compared with OFDM, OFDM-IM, OFDM-AIM, and GA-OFDM-AIM (Genetic algorithm-based OFDM-AIM) techniques and it is seen that ACO-OFDM-AIM has the best BER performance.

Key Words

“5G, OFDM-IM, OFDM-AIM, Ant Colony Optimization”

1. Giriş

MIMO (Çoklu giriş çoklu çıkış, Multiple input multiple Output) anten tekniği (Lu vd., 2014), günümüz iletişim sistemlerinde yaygın bir şekilde kullanılıyor olmasının yanı sıra 5G (beşinci nesil, Fifth Generation) (Andrews vd., 2014) ve ötesi kablosuz iletişim sistemleri için de temel teknolojiler arasında yer almaktadır. Bununla birlikte antenler-arası eşleme (inter-antenna synchronization) ve kanallar-arası girişim (inter-channel interference) problemleri, MIMO tekniğini kullanan sistemlerin performansını sınırlamaktadır. MIMO'nun bu dezavantajının aşılması amacıyla bir anten dizisi içerisinde aktif duruma getirilecek antenlerin (anten indeksleri) veri bitleri kullanılarak belirlenmesi prensibine dayanan SM (uzaysal modülasyon, Spatial Modulation) tekniği önerilmiştir (Wen vd., 2019). SM'nin yapısı sayesinde veri bitlerinin bir bölümünün anten indeksleri ile taşınarak spektral verimliliğin (spectral efficiency) artırılması sağlanmıştır.

MIMO tekniği gibi OFDM (Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) tekniği de günümüz kablosuz iletişim sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Hwang vd., 2009; Boroujeny & Moradi, 2016). Bu sistemler arasında WiMAX (Mikrodalga Erişimi için Dünya Çapında Uyumluluk, Worldwide Interoperability for Microwave Access (IEEE 802.16)), LTE (Uzun Vadeli Evrim, Long Term Evolution) ve WLAN (Kablosuz Yerel Alan Ağları, Wireless Local Area Networks (IEEE 802.11)) vb. yer almaktadır (Andrews vd., 2007; Dahlman vd., 2013; Crow vd., 1997). Ayrıca, 5G ve ötesi iletişim sistemleri için aday iletim tekniklerinin büyük ölçüde OFDM temel alınarak geliştirilmesi, OFDM üzerindeki geniş çaplı çalışmaların sürdürülmesine neden olmaktadır. Bu çalışmalar arasında SM tekniğinden esinlenerek geliştirilen OFDM-IM (İndeks Modülasyonlu Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama, Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Index Modulation), tekniği önemli bir yere sahiptir (Başar vd., 2013).

OFDM-IM tekniğinde mesaj bit bloğu, veri bitleri ve indeks bitleri olmak üzere iki gruba ayrılır. İndeks bitleri, aktif ya da pasif duruma getirilecek alt-taşıyıcıları belirleyerek alt-taşıyıcı indekslerini oluşturur. Alt-taşıyıcı indeksleri yoluyla indeks bitlerinin iletilmesi sağlanır. Veri bitleri ise PSK/QAM takımyıldızı eşleştirilmeleri yapılarak aktif alt-taşıyıcılar tarafından iletimi gerçekleştirilir. OFDM-IM'nin bu yapısı tüm alt-taşıyıcıları aktif olan OFDM'den temel farkını ortaya koymaktadır. OFDM-IM sahip olduğu düşük PAPR (tepe gücü ortalama güç oranı, Peak to Average Power Ratio), daha iyi bir BER (Bit Hata Oranı, Bit Error Rate) performansı, enerji verimliliği (energy efficiency) ve kanallar-arası girişime karşı dayanıklılık gibi özellikleri OFDM'ye göre üstünlükleri olarak sıralanabilir (Başar vd., 2013; Wen vd., 2017; Başar 2016; Fan vd., 2015).

Yukarıda sıralanan avantajlarının yanı sıra, kullanılmayan alt-taşıyıcıların varlığı OFDM-IM'nin performansını sınırlayan en büyük etkenlerden birisidir. Bu dezavantajın giderilmesi amacıyla literatürde son yıllarda birçok çalışma gerçekleştirilmiştir (Başar, 2015; Xiao vd., 2014; Mao vd., 2017; Shi vd., 2019). Başar (2015) çalışmasında, uzay-zaman blok kodları ve koordinat serpiştirme OFDM-IM tekniği ile birleştirilerek (CI-OFDM-IM (Koordinat Serpiştirme OFDM-IM, Coordinate Interleaving OFDM-IM) çeşitlilik kazancının artırılmasını sağlamış ve bu yolla sistemin BER başarısını artırmıştır. Çeşitlilik kazancı, alt-taşıyıcıların birbirlerine mümkün olduğu kadar benzememesinin bir ölçüsü olarak ifade edilebilir. Xiao vd. (2014) çalışmalarında, en uygun aktif alt-taşıyıcı sayısını, sistemin BER performansının artırılması amacıyla araştırmışlardır. OFDM-IM'nin boş alt taşıyıcılara sahip olmasından kaynaklı nispeten düşük spektral verimliliğinin artırılması amacıyla DM-OFDM-IM (çift modlu OFDM-IM, Dual Mode OFDM-IM) önerilmiştir (Mao vd., 2017). DM-OFDM-IM'de alt-taşıyıcıların tamamı aktif edilirken mesaj bit bloğu, OFDM-IM'de olduğu gibi veri bitlerine ve indeks bitlerine bölünür. İndeks bitleri, iki farklı uzaya ayrılan PSK/QAM takımyıldızı seçimini gerçekleştirirken, veri bitleri ise tamamı aktif olan alt-taşıyıcılar aracılığıyla iletilirler.

OFDM-IM temel alınarak geliştirilen ve alt-taşıyıcıların tamamının kullanıldığı OFDM-AIM (Tüm İndeks Modülasyonlu OFDM, OFDM with All Index Modulation) tekniğinde, çeşitlilik kazancının artırılmasıyla birlikte BER performansının iyileştirilmesi sağlanmıştır (Shi vd., 2019). Genetik algoritma (Genetic Algorithm) tabanlı bir OFDM-AIM tekniğini (Shi vd. 2019) önererek (GA-OFDM-AIM) çeşitlilik kazancının daha da artırılmasını hedeflenmişlerdir. OFDM-AIM tekniğinde sabit olan PSK/QAM takımyıldızı noktaları, genetik algoritma yardımıyla çeşitlilik kazancının artırılması amacıyla çözüm uzayında farklı noktalar aranarak optimize edilir. En iyi BER değerine sahip yeni takımyıldızı noktaları optimum alt-blok seti olarak belirlenir. OFDM-AIM tabanlı başka bir alt-blok set tasarımı ise Yıldırım (2020) tarafından ABC (yapay arı kolonisi, Artificial Bee Colony) algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

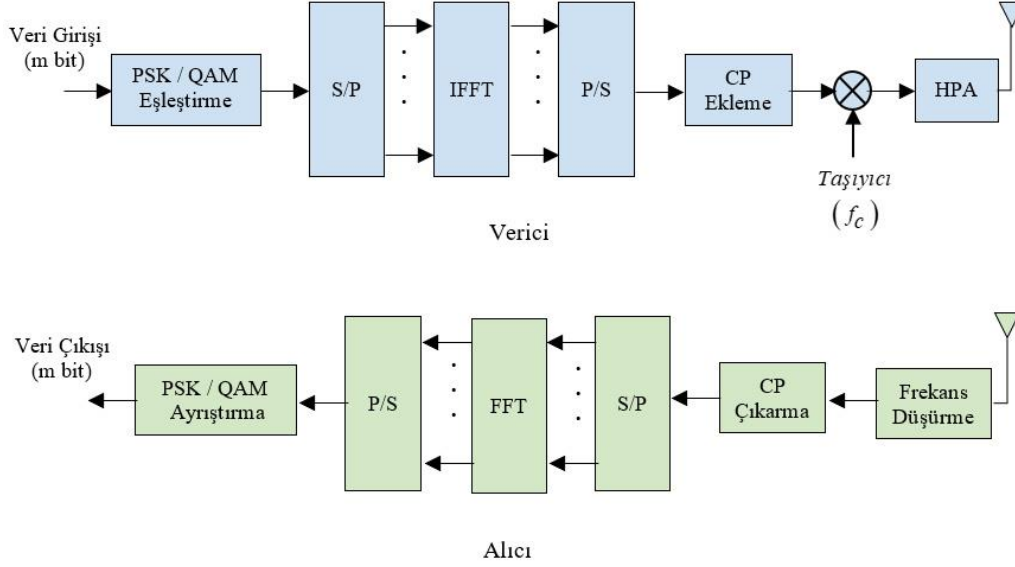
Bu çalışmada, OFDM-AIM tekniğinin çeşitlilik kazancının artırılarak BER performansının iyileştirilmesi amacıyla KKO (Karnca Kolonisi Optimizasyonu, Ant Colony Optimization) algoritması (Chen vd., 2013) tabanlı alt-blok set tasarımı önerilmiştir (KKO-OFDM-AIM). KKO algoritması ile alt-blok set tasarımında, optimum alt-taşıyıcı noktaları PSK/QAM takımyıldızı uzayında araştırılmıştır. KKO optimizasyonunda alt-blok setlerinin uygunlukları, iletişim sisteminin ABEP (Ortalama Bit Hata Olasılığı, Average Bit Error Probability) değerine göre belirlenmektedir. Önerilen KKO-OFDM-AIM'nin performansı, OFDM, OFDM-IM, OFDM-AIM ve GA-OFDM-AIM ile BER başarı kriterine göre karşılaştırılmış ve en iyi sonucu veren teknik olduğu görülmüştür. Ayrıca KKO algoritması ile alt-blok set tasarımı, çevrim dışı bir optimizasyon süreci olduğu için sistemin iletim hızına olumsuz bir etkisi bulunmamaktadır.

Makalenin geri kalan bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir: 2. bölümde, OFDM, OFDM-IM ve OFDM-AIM iletim teknikleri, 3. bölümde, OFDM-AIM için önerilen karınca kolonisi optimizasyon algoritması tabanlı alt-blok set tasarımı, 4. bölümde, simülasyon çalışmaları ve 5. bölümde sonuçlar verilmiştir.

2. İletim Teknikleri

2.1. OFDM

Günümüz iletişim sistemlerinde en çok tercih edilen çoğullama tekniklerinden birisi olan OFDM ile birlikte semboller-arası girişim (Inter-symbol Interference) ve kanallar-arası girişim problemleri önemli ölçüde azaltılmıştır. MIMO teknolojisini kullanan iletişim sistemlerinde de sıklıkla kullanılan OFDM'nin temel blok şeması Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. OFDM iletim tekniğinin blok diyagramı.

İlk olarak, Mesaj bitleri ile PSK/QAM takımyıldız eşleştirmeleri yapılır. Bu sayede, haberleşme sistemi için tahsis edilen bant genişliğinin daha verimli kullanılması sağlanmış olur. Daha sonra, S/P (Seri/Paralel dönüşüm) ve IFFT (Ters Hızlı Fourier Dönüşümü, Inverse Fast Fourier Transform) işlemleri gerçekleştirilir. IFFT işlemi ile birlikte N adet alt-taşıyıcı üretilirken işaretlerin de frekans ekseninden zaman eksenine aktarımı sağlanmış olur. N IFFT uzunluğuna sahip bir OFDM sembolü $\mathbf{x} = [x_1, x_1, \dots, x_{N-1}, x_N]$ şeklinde ifade edilebilir. P/S (Paralel/Seri dönüşüm) ardından bir sonraki adım olan CP (Döngüsel Önek, Cycle Prefix) bloğu ile semboller-arası girişimin önlenmesi hedeflenmektedir. Döngüsel önek işlemi, N uzunluğundaki bir OFDM sembolü dizisindeki son $N/8$ veya $N/4$ uzunluğundaki (L_{CP}) bölümünün aynı dizinin önüne eklenmesi ile gerçekleştirilmektedir. Böylece bir OFDM sembolü, $N + L_{CP}$ uzunluğa sahip olmaktadır. Yüksek frekanslı taşıyıcı işareti ile frekansı yükseltilen OFDM sembolü son olarak, HPA (Yüksek Güç Kuvvetlendirici, High Power Amplifier) ile kuvvetlendirilerek iletim kanalına aktarılır.

İletim kanalından geçerek sistem alıcı birimine ulaşan mesaj işareti, ilk olarak frekans düşürme işlemi ile temel bant frekans seviyesine indirgenir. Döngüsel önek bilgisi çıkarılan işaret, Seri/Paralel dönüşümü yapıldıktan sonra, FFT işlemi ile birlikte zaman ekseninden frekans eksenine aktarılmış olur. Paralel/Seri dönüşümden sonra PSK/QAM takımyıldız eşleştirmeleri çözülerek mesaj bitleri elde edilir. Veri girişindeki mesaj bitleri ile sistemin alıcı biriminden sonunda elde edilen mesaj bitleri karşılaştırılarak sistemin BER performansı belirlenmektedir.

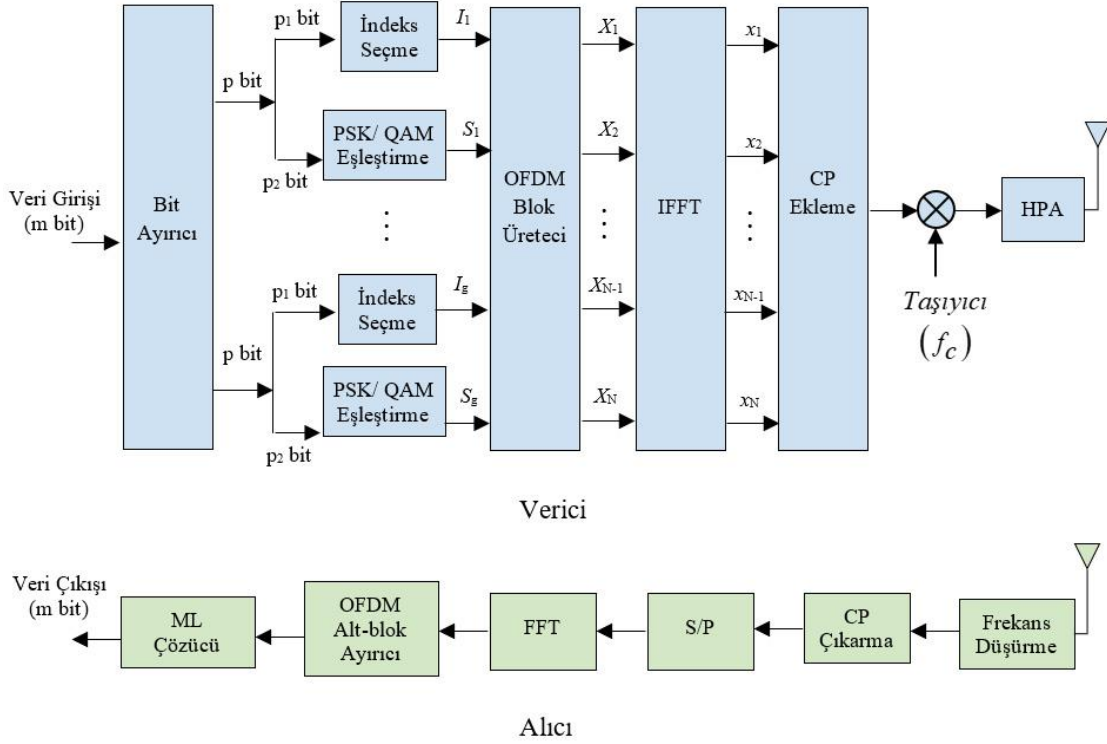
OFDM temelli iletim tekniklerinde önemli bir parametre olan SE (Spektral Verimlilik, Spectral Efficiency), herhangi bir iletim tekniğinde $N + L_{CP}$ uzunluğundaki bir sembolde iletilen bit sayısı ile orantılıdır.

$$SE = \frac{m}{N + L_{CP}} [bit/s/Hz] \quad (1)$$

burada m bir sembolde iletilen toplam bit sayısı, s saniye ve Hz frekans birimleridir.

2.2. OFDM-IM

5G ve ötesi iletişim sistemleri için aday iletim tekniklerinden birisi olarak son yıllarda üzerinde birçok çalışma gerçekleştirilen OFDM-IM'nin blok şeması Şekil 2'de görülmektedir. OFDM-IM sembolü, her birinde n adet alt-taşıyıcı bulunan G adet alt-bloğun birleşmesiyle toplamda N adet alt-taşıyıcıdan oluşmaktadır. Bir OFDM-IM sembolünde iletilecek olan m adet mesaj bit bloğu, bit



Şekil 2. OFDM-IM iletim tekniğinin blok diyagramı.

Tablo 1. OFDM-IM için alt-taşıyıcı şablonu ($n = 4$)

İndeks bitleri (p_1)	Alt-taşıyıcı İndeks	Alt-taşıyıcılar
[0 0]	[1,2]	$[S_{A1}, S_{A2}, S_{P1}, S_{P2}]$
[0 1]	[2,3]	$[S_{P1}, S_{A1}, S_{A2}, S_{P2}]$
[1 0]	[3,4]	$[S_{P1}, S_{P1}, S_{A2}, S_{A2}]$
[1 1]	[1,4]	$[S_{A1}, S_{P1}, S_{P2}, S_{A2}]$

ayırıcı tarafından her birinde p bit olmak üzere G gruba ayrılır ($m = G * p$). p adet bit, indeks bitleri (p_1) ve veri bitleri (p_2) olmak üzere iki gruba ayrılır. İndeks bitleri, bir alt-bloktaki aktif ya da pasif edilecek alt-taşıyıcıları belirler. Tablo 1’de alt-taşıyıcı sayısı $n = 4$, aktif alt-taşıyıcı sayısı $k = 2$ ve pasif alt-taşıyıcı sayısı $l = 2$ değerlerine sahip bir alt-blok yapısı görülmektedir. 2 bitlik indeks bit dizisinin olası değerlerine göre oluşturulan toplam $2^{p_1} = 2^2 = 4$ alt-blok için S_A ve S_P sırasıyla aktif ve pasif alt-taşıyıcıları temsil etmektedir. Böylelikle, aktif ve pasif alt-taşıyıcıların konumu ile indeks bitleri iletilmektedir. Veri bitleri, PSK/QAM takımıyla eşleştirmeleri yapılarak aktif durumda olan alt-taşıyıcılar yoluyla iletilir. Üretilen G adet alt-blok, OFDM blok üretici ile tekrar N adet alt-taşıyıcı dizisi şeklinde birleştirilir. Daha sonra sırasıyla IFFT, döngüsel önek ekleme, frekans yükseltme ve işaret kuvvetlendirme işlemleri ile birlikte OFDM-IM sembolleri iletişim kanalına aktarılır. Sistemim alıcı birimine ulaşan ve sırasıyla frekans düşürme, CP çıkarma, S/P dönüştürme ve FFT işlemleri uygulanan N uzunluğa sahip işaret dizisi, aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\mathbf{h} + \mathbf{w} \quad (2)$$

Burada \mathbf{X} , sistem verici birimindeki OFDM blok üretici tarafından oluşturulan işaret dizisi, \mathbf{h} kanal vektörü ve \mathbf{w} kanal gürültü vektörüdür. Daha sonra, \mathbf{y} OFDM alt-blok ayırıcı tarafından G adet alt-bloka dönüştürülür. Dönüşüm sonrasında, her bir alt-blok aşağıdaki gibi temsil edilebilir:

$$\mathbf{y}_g = \mathbf{S}_g \mathbf{h}_g + \mathbf{w}_g, \quad g = 1, \dots, G \quad (3)$$

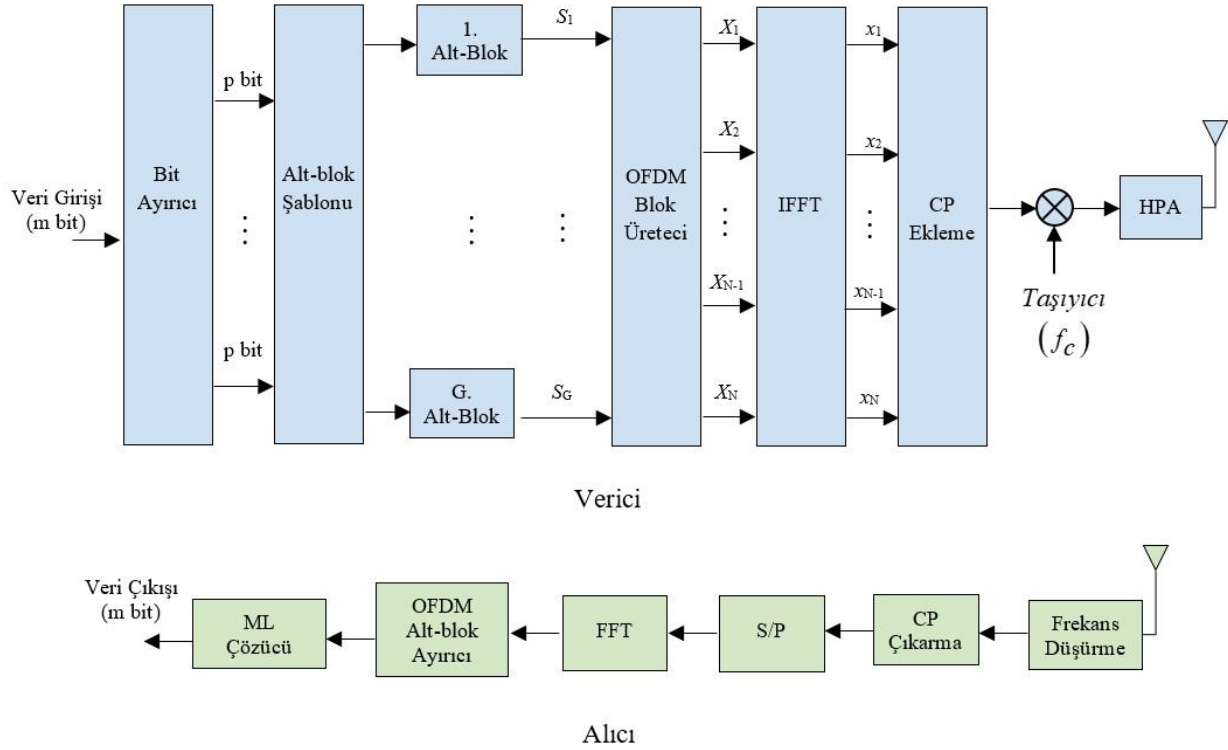
Burada \mathbf{S}_g sistem verici biriminde oluşturulan G adet alt-bloktan her birini temsil etmektedir. Son olarak, mesaj bit bloğu ve vericide üretilen alt-bloklar, ML (Maksimum Olabilirlik Maximum Likelihood) işlemi ile tespit edilmeye çalışılır.

$$\hat{\mathbf{S}}_g = \arg \min_{\mathbf{S}_g} \|\mathbf{y}_g - \mathbf{S}_g \mathbf{h}_g\|^2 \quad (4)$$

Burada $\|\cdot\|$, Öklid normunu, $\arg \min_{S_g} \|\cdot\|$ ise öklid normunun minimum değerini temsil etmektedir.

2.3. OFDM-AIM

OFDM-IM tekniğinden esinlenerek geliştirilen OFDM-AIM tekniği, alt-taşıyıcılarının tümünün aktif olması sebebiyle OFDM-IM'ye göre daha fazla çeşitlilik kazancı sunmaktadır. Şekil 3'de görüldüğü üzere N uzunluğundaki bir OFDM-AIM sembolü, her birinde n adet alt-taşıyıcı bulunan G adet alt-bloktan oluşmaktadır. OFDM-AIM sembolü üretiminde ilk olarak, m adet mesaj bit bloğu, bit ayırıcı tarafından p uzunluğundaki veri bit dizilerine ayrılır. Veri bitlerinin PSK/QAM takımyıldızı eşleştirilmeleri gerçekleştirildikten sonra, n adet çoğullanan her bir eşleştirme bir alt-taşıyıcı tarafından iletilir.



Şekil 3. OFDM-AIM iletim tekniğinin blok diyagramı.

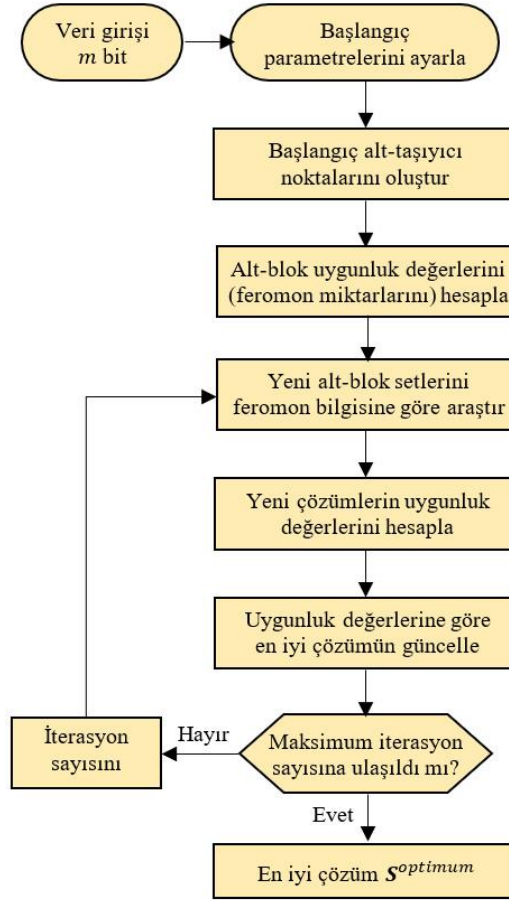
Tablo 2'de alt-taşıyıcı sayısı $n = 4$, veri bit sayısı $p = 4$ değerlerine sahip bir alt-blok şablonu görülmektedir. Alt-blok şablonuna göre üretilen G adet alt-blok, OFDM blok üretici ile tekrar N adet alt-taşıyıcı dizisi şeklinde birleştirildikten sonra sırasıyla IFFT, döngüsel önek ekleme, frekans yükseltme ve işaret kuvvetlendirme işlemleri ile birlikte OFDM-AIM sembolleri elde edilmiş olur. Şekil 3'de görüldüğü gibi OFDM-AIM tekniği, OFDM-IM'den alt-blok üretme işleminde farklılık gösterirken diğer alt işlemlerde benzer bir yapıya sahiptir.

Tablo 2. OFDM-AIM için alt-taşıyıcı şablonu ($n = 4$)

Veri bitleri (p)	Alt-taşıyıcılar
[0 0 0 0]	$[S_{A1}, S_{A1}, S_{A1}, S_{A1}]$
[0 0 0 1]	$[S_{A2}, S_{A2}, S_{A2}, S_{A2}]$
...	...
[1 1 1 0]	$[S_{A15}, S_{A15}, S_{A15}, S_{A15}]$
[1 1 1 1]	$[S_{A16}, S_{A16}, S_{A16}, S_{A16}]$

3. Önerilen KKO Algoritması Tabanlı OFDM-AIM Tekniği (KKO-OFDM-AIM)

KKO algoritması, gerçek karınca kolonilerinin yiyecek arama davranışlarının modellenmesiyle geliştirilmiş popülasyon tabanlı yapay zeka algoritmasıdır. Karıncalar, bir yiyecek kaynağı araştırırken feromon adlı bir sıvı salgırlar. Zamanla buharlaşıp yok olma özelliği gösteren Feromon, bir yiyecek kaynağının, yuvadan uzaklığı (uygunluk değeri) hakkında kolonideki diğer karıncalara bilgi



Şekil 4. Karınca Kolonisi Optimizasyonu (KKO) Algoritması akış şeması.

sağlamaktadır. Feromon yoğunluğunun çok olduğu güzergahtaki yiyecek kaynağının yuvaya daha yakın (yüksek uygunluk değeri), feromon yoğunluğunun az olduğu güzergahtaki yiyecek kaynağının ise yuvaya uzak olduğu (düşük uygunluk değeri) anlamına gelmektedir. Şekil 4'de KKO algoritması ile alt-blok set tasarımının akış şeması görülmektedir.

KKO ile alt-blok set tasarımında, her bir yiyecek kaynağının rotası bir alt-blok setini, ilgili alt-blok setinin feromon miktarı yani uygunluğu ise ABEP (Ortalama Bit Hata Olasılığı, Average Bit Error Probability) değerini temsil etmektedir. Bir OFDM-AIM iletim tekniğinin ABEP değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Başar vd., 2013):

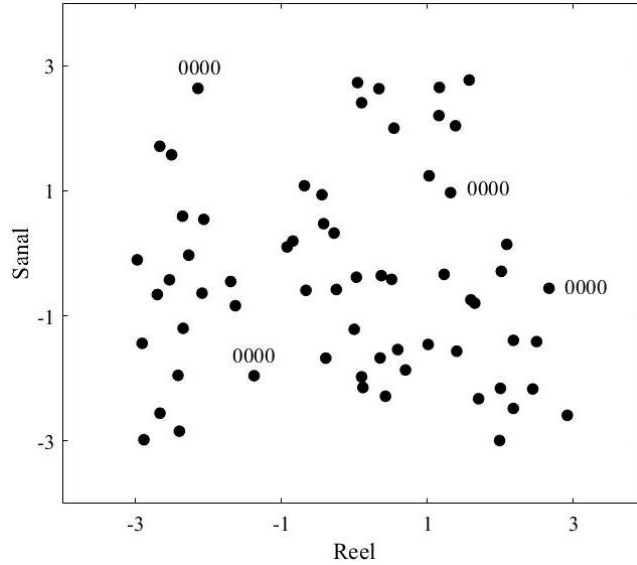
$$P_{ABEP} = \frac{1}{pn_{S_g}} \sum_{S_g} \sum_{\hat{S}_g} P_U(S_g \rightarrow \hat{S}_g) \epsilon(S_g, \hat{S}_g) \quad (5)$$

burada $\epsilon(S_g, \hat{S}_g)$ vericide üretilen S_g alt-bloğunun alıcıda hatalı çözülmesi (\hat{S}_g) durumundaki hatalı bit sayısını, $n_{S_g} = 2^p$ olası tüm S_g alt-blok sayısını, $P_U(S_g \rightarrow \hat{S}_g)$ aşağıda gösterildiği üzere koşulsuz UPEP'i (Koşulsuz İkili Hata Olasılığını, Unconditional Pairwise Error Probability) ifade etmektedir (Başar vd., 2013).

$$P_U(S_g \rightarrow \hat{S}_g) \approx \frac{1/12}{\det(\mathbf{I}_n + \mathbf{A}_n \boldsymbol{\gamma} / 4N_{0,F})} + \frac{1/12}{\det(\mathbf{I}_n + \mathbf{A}_n \boldsymbol{\gamma} / 4N_{0,F})} \quad (6)$$

burada \mathbf{I}_n ve \mathbf{A}_n , sırasıyla $n \times n$ boyutlarında birim matris ve korelasyon matrisi, $\boldsymbol{\gamma} = (S_g - \hat{S}_g)^H (S_g - \hat{S}_g)$, $(\cdot)^H$ Hermitian dönüşümünü ifade etmektedir.

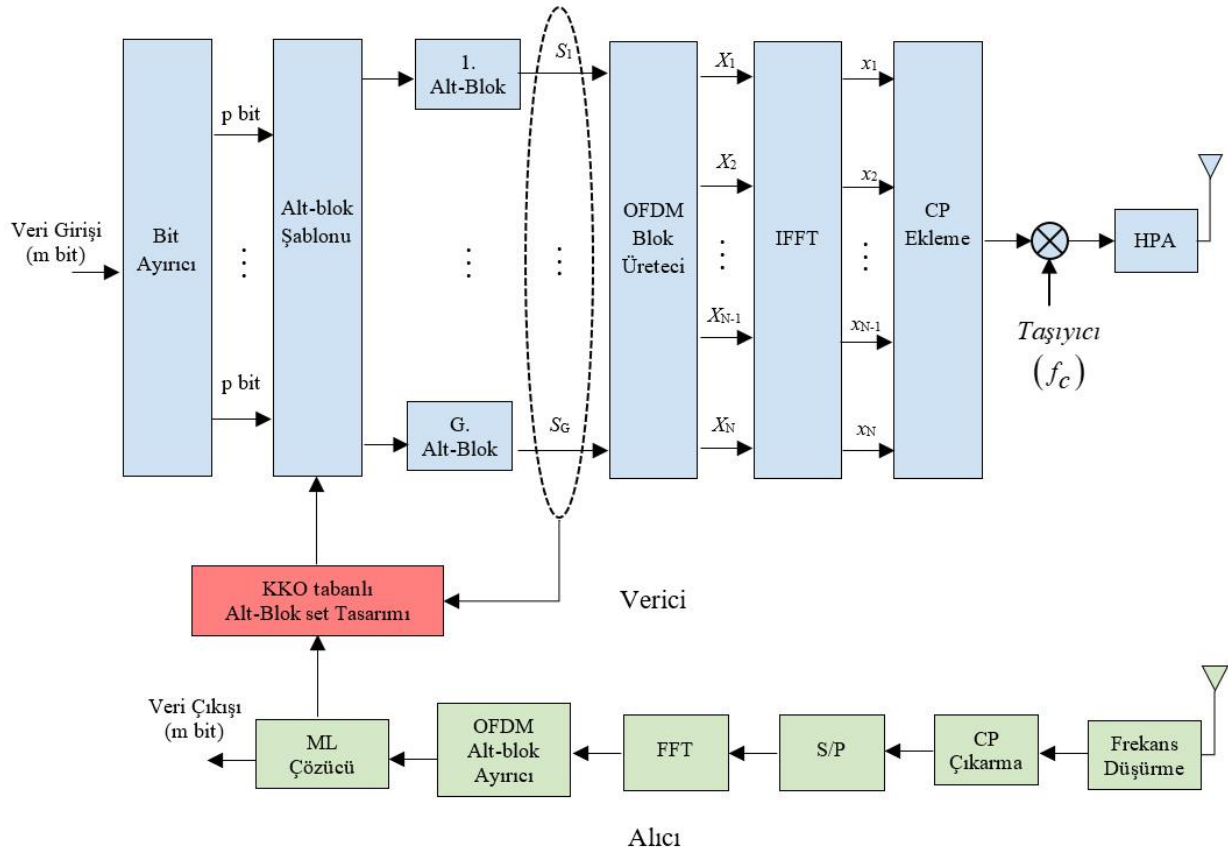
OFDM-AIM tekniğinde veri bitleri, reel ve sanal eksenlerdeki değerleri sabit olan PSK/QAM takımyıldızı noktaları ile eşleştirilirken KKO-OFDM-AIM tekniğinde, çeşitlilik kazancının daha da artırılması amacıyla PSK/QAM takımyıldızı uzayının tamamı olası eşleştirme noktaları olarak belirlenebilir. KKO algoritması sonucunda elde edilen ve en iyi ABEP değerine sahip eşleştirme noktaları optimum alt-blok seti olarak belirlenir ($S^{optimum}$).



Şekil 5. KKO Algoritması ile elde edilen alt-blok seti örneği.

$$\mathbf{S}^{optimum} = [\mathbf{S}^{(1)} \mathbf{S}^{(2)} \dots \mathbf{S}^{(2^P)}] \quad (7)$$

burada $\mathbf{S}^{(i)}$ her bir alt-bloğu, i ise alt-blok indeksini temsil etmektedir. Şekil 5’de KKO algoritması sonucu elde edilmiş bir alt-blok seti için örnek eşleştirme noktaları görülmektedir. Şekil 5’de ‘0000’ veri bit dizisi için eşleştirme noktaları ayrıca gösterilmektedir.



Şekil 6. KKO-OFDM-AIM iletim tekniğinin blok şeması.

Optimizasyon, PSK/QAM takımıyıldız uzayında alt-taşıyıcı noktalarının rasgele belirlenmesiyle başlar. c adet üretilen alt-blok setlerinin uygunluk değerleri, sistemin ABEP başarısına göre belirlendikten sonra alt-blok setleri uygunluk değerlerine göre en iyiden en kötüye göre sıralanır. İlerleyen çevrimlerdeki yeni alt-taşıyıcı noktalarının konumu, önceki çevrimlerde elde edilen çözümlerin

uygunluk değerleri bilgileri dikkate alınarak belirlenmektedir. OFDM-AIM'deki aynı eşleştirme noktası n kez çoğullanırken, KKO-OFDM-AIM tarafından çeşitlilik kazancının artırılması amacıyla n farklı nokta olarak belirlenir. Böylelikle KKO algoritması, $n_{sg} * n$ eşleştirme noktası için optimizasyon gerçekleştirmektedir. KKO-OFDM-AIM tekniği blok şeması Şekil 6'da gösterilmektedir. Şekil 6'da görüleceği üzere KKO-OFDM-AIM'in alt-blok oluşturma yapısı OFDM-AIM'den farklılık gösterirken diğer alt işlemler benzerlik göstermektedir.

4. Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde, önerilen KKO-OFDM-AIM tekniğinin performansı ABEP ve BER başarı kriterlerine göre değerlendirilmiştir. KKO-OFDM-AIM tekniğinin performansı, Tablo 3'de verilmiş olan sistem parametrelerine göre OFDM, OFDM-IM, CI-OFDM-IM, OFDM-AIM ve GA-OFDM-AIM teknikleri ile $L_{ch} = 10$ uzunluğundaki frekans seçici Rayleigh sönümlmeli kanal için karşılaştırılmıştır.

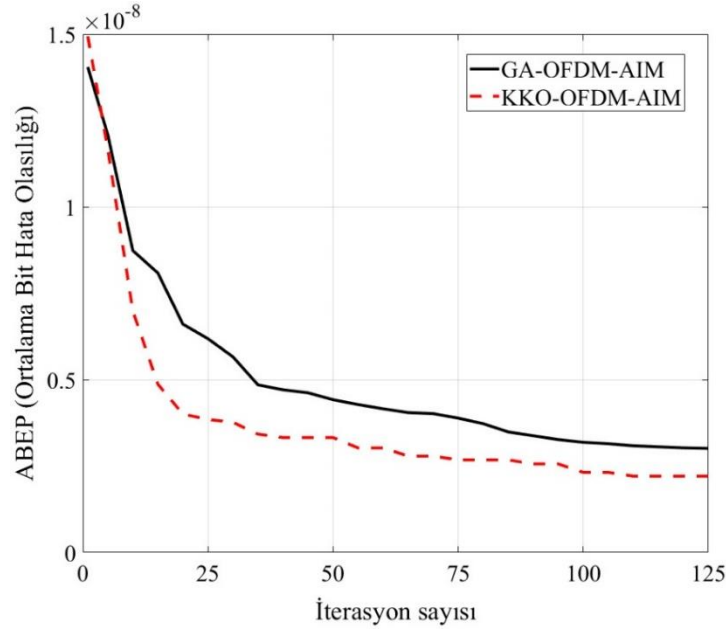
Tablo 3. Sistem parametreleri

Parametre	Değer
Toplam Alt-taşıyıcı	$N = G * n = 128$
Alt-blok	$G = 32$
Bir alt-bloktaki alt-taşıyıcı sayısı	$n = 4$
Bir sembolde iletilen bit sayısı	$m = G * p = 128, \quad p = 4 \text{ için}$ $m = G * p = 256, \quad p = 8 \text{ için}$
Bir alt-bloktaki aktif alt-taşıyıcı sayısı (KKO-OFDM-AIM / OFDM-IM)	$k = 4 / k = 2$
KKO için araştırma sayısı	$AS = KS * \text{İterasyon}$ $= 10 * 100 = 1000$
Döngüsel önek (CP)	$L_{CP} = N/8 = 16$
Rayleigh Kanal için kanal uzunluğu	$L_{ch} = 10$
Modülasyon	16QAM, $p = 4 \text{ için}$ 256QAM, $p = 8 \text{ için}$
Spektral verimlilik (SV)	$SV = 0.8889 \text{ [bit/s/Hz]}, m=128$ $SV = 1.7778 \text{ [bit/s/Hz]}, m=256$

Bir KKO-OFDM-AIM sembolü, p veri bitlerine göre alt-blok setinden seçilen alt-bloklardan oluşmaktadır. $p = 4$ bit ve $p = 8$ bit veri dizisi uzunlukları için bir alt-blok setinde sırasıyla, $n_{sg} = 16$ ve $n_{sg} = 256$ alt-blok bulunmaktadır.

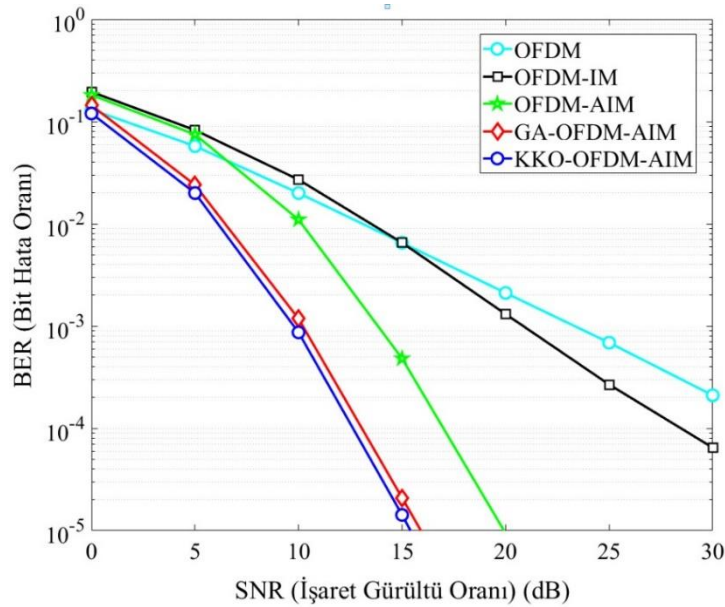
KKO algoritması ile optimum alt-blok seti tasarımında popülasyon büyüklüğü (karmıca sayısı) $KS = 100$, iterasyon sayısı $\text{İterasyon} = 125$ olarak belirlenmiştir. Önerilen KKO-OFDM-AIM ile ABEP ve BER performanslarının karşılaştırıldığı GA-OFDM-AIM tekniğinde genetik algoritma, popülasyon büyüklüğü $Pop = 100$ ve iterasyon sayısı $\text{İterasyon} = 125$ olarak araştırmasını gerçekleştirmiştir. Böylece KKO ve genetik algoritma, $AS = 12500$ araştırma sayısı için karşılaştırılmıştır.

Şekil 7'de KKO-OFDM-AIM ve GA-OFDM-AIM tekniklerinin ABEP performansları $SE = 0.8889 \text{ [bit/s/Hz]}$ spektral verimlilik değeri için karşılaştırılmıştır. Böylece karşılaştırma, her iki teknik için de $p = 4$ ve $m = 128$ değerleri için gerçekleştirilmiştir. Şekil 7'de görüleceği üzere önerilen KKO-OFDM-AIM, GA-OFDM-AIM tekniğine göre neredeyse tüm iterasyon sayısı değerlerinde daha düşük bir ABEP değerine sahiptir. Bu durumda KKO algoritması sonucu elde edilen alt-blok setinin uygunluğunun, genetik algoritma sonucu elde edilen alt-blok setinin uygunluğundan daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

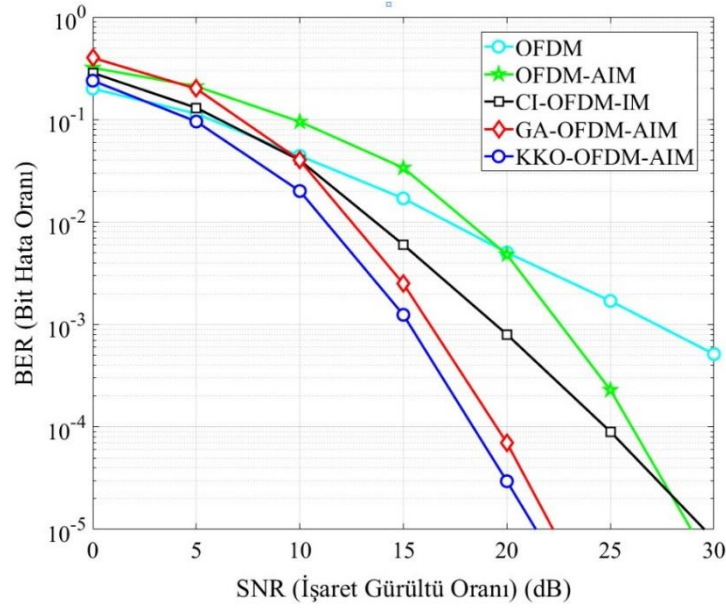


Şekil 7. KKO-OFDM-AIM ve GA-OFDM-AIM tekniklerinin, uygunluk fonksiyonu olarak ABEP karşılaştırmaları.

Şekil 8 ve 9'da OFDM (Hwang vd., 2009), OFDM-IM (Başar vd., 2013), CI-OFDM (Başar, 2015), OFDM-AIM (Shi vd., 2019), GA-OFDM-AIM (Shi vd., 2019) ve önerilen KKO-OFDM-AIM İletim tekniklerinin SNR-BER performansları karşılaştırmaları görülmektedir. Şekil 8 ve 9'da karşılaştırmalar sırasıyla, $SE = 0.8889$ bits/s/Hz ($p = 4$ bit) ve $SE = 1.7778$ ($p = 8$ bit) spektral verimlilik durumları için gerçekleştirilmiştir. Her iki şekilden de görüleceği gibi önerilen KKO-OFDM-AIM, en başarılı BER performansına sahip iletim tekniği olmuştur. Örneğin Şekil 9 dikkate alındığında, KKO-OFDM-AIM, BER = 10^{-5} değerinde GA-OFDM, CI-OFDM-IM ve OFDM-AIM tekniklerinden sırasıyla, 1 dB, 7.5 dB ve 8 dB daha iyi bir SNR (işaret gürültü oranı, Signal to Noise Ratio) değerine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Önerilen KKO-OFDM-AIM ile diğer iletim tekniklerinin SNR-BER performansı karşılaştırılması ($SE=0.8889$ bits/s/Hz).



Şekil 9. Önerilen KKO-OFDM-AIM ile diğer iletim tekniklerinin SNR-BER performansı karşılaştırılması (SE=1.7778 bits/s/Hz).

5. Sonuçlar ve Gelecek Çalışmalar

OFDM-IM (İndeks Modülasyonlu Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama), sahip olduğu yüksek enerji ve spektral verimliliğinden dolayı gelecek nesil kablosuz ağlar için aday iletim teknikleri arasında yer almaktadır. Son yıllarda OFDM-IM tekniğinin geliştirilmesi amacıyla literatürde birçok teknik önerilmiştir. Bu tekniklerden birisi olan OFDM-AIM (Tüm İndeks Modülasyonlu OFDM)'de, veri iletimi için kullanılmayan alt-taşıyıcılara sahip olan OFDM-IM'den farklı olarak tüm alt-taşıyıcılar aktif duruma getirilmiş ve bu yolla spektral verimliliğin daha da artırılması amaçlanmıştır. Bu makalede, OFDM-AIM'in bit hata oranı (BHO) performansının iyileştirilmesi amacıyla karınca kolonisi optimizasyonu (KKO) algoritması tabanlı bir alt-blok set tasarımı önerilmiştir (KKO-OFDM-AIM). Klasik OFDM-AIM tekniğinde alt-blok seti, PSK/QAM takımyıldızı noktalarından oluşurken; önerilen KKO-OFDM-AIM tekniğinde, PSK/QAM takımyıldızı uzayının tamamında en yüksek uygunluk değerine (en düşük ABEP değeri) sahip alt-blok seti araştırılır. Simülasyon çalışmalarında, KKO-OFDM-AIM'in ABEP performansını, bir başka sezgisel optimizasyon yöntemi olan genetik algoritma (GA) tabanlı OFDM-AIM (GA-OFDM-AIM) ile karşılaştırılmış ve daha düşük ABEP değerlerine sahip olduğu görülmüştür. KKO-OFDM-AIM'in BHO performansı ise OFDM, OFDM-IM, OFDM-AIM ve GA-OFDM-AIM teknikleri ile karşılaştırılmış ve en iyi BHO başarısına sahip olduğu görülmüştür.

Gelecek çalışmalar temel olarak iki yönde düşünülebilir. Birincisi, alt-blok set tasarımı için önerilen KKO algoritması, DM-OFDM-IM gibi diğer IM tabanlı iletim tekniklerinin BHO performanslarının artırılması için de uygulanabilir. İkinci olarak, KKO algoritması veya başka sezgisel algoritmalar IM tabanlı tekniklerin farklı problemleri için kullanılabilir. Örneğin alt-taşıyıcı sayısı modülasyonu tabanlı OFDM (SNM-OFDM) tekniğindeki (Dang vd., 2019) en uygun alt-taşıyıcı sayısının araştırılması için sezgisel algoritmalar kullanılabilir.

Referanslar

- Andrews, J. G., Ghosh, A., & Muhamed, R. (2007). *Fundamentals of WiMAX: understanding broadband wireless networking* (1st ed.). Pearson Education.
- Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano A., Soong, C. K., & Zhang, J.C. (2014). What Will 5G Be?. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 32(6), 1065-1082. doi: 10.1109/JSAC.2014.2328098
- Başar, E., Aygözü, Ü., Panayırıcı, E., & Poor, H. V. (2013). Orthogonal Frequency Division Multiplexing With Index Modulation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 61(22), 5536-5549. doi: 10.1109/TSP.2013.2279771
- Basar, E. (2016). On Multiple-Input Multiple-Output OFDM with Index Modulation for Next Generation Wireless Networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 64(15), 3868-3878. doi: 10.1109/TSP.2016.2551687
- Başar, E. (2015). OFDM With Index Modulation Using Coordinate Interleaving. *IEEE Wireless Communications Letters*, 4(4), 381-384. doi: 10.1109/LWC.2015.2423282

- Boroujeny, B. F., & Moradi, H. (2016). OFDM Inspired Waveforms for 5G. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(4), 2474-2492. doi: 10.1109/COMST.2016.2565566
- Chen, W., & Zhang, J. (2013). Ant colony optimization for software project scheduling and staffing with an event-based scheduler. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 39(1), 1-17. doi: 10.1109/TSE.2012.17
- Crow, B. P., Widjaja, I., Kim, J. G., & Sakai, P. T. (1997). IEEE 802.11 wireless local area networks. *IEEE Communications Magazine*, 35(9), 116–126. doi: 10.1109/35.620533
- Dahlman, E., Parkvall, S., & Skold, J. (2013) 4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband (2nd ed.). Academic press.
- Dang, S., Ma, G., Shihada, B., & Alouini, M. S. (2019). Enhanced orthogonal frequency-division multiplexing with subcarrier number modulation. *IEEE Internet Things Journal*, 6(5), 7907–7920. doi 10.1109/JIOT.2019.2914175
- Fan, R., Yu, Y. J. & Guan, Y. L. (2015). Generalization of Orthogonal Frequency Division Multiplexing With Index Modulation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 14(10), 5350-5359. doi: 10.1109/TWC.2015.2436925
- Hwang, T., Yang, C., Wu, G., Li, S., & Li, G.Y. (2009). OFDM and Its Wireless Applications: A Survey. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(4), 1673-1694. doi: 10.1109/TVT.2008.2004555
- Lu, L., Li, G. Y., Swindlehurst, A. L., Ashikhmin, A., & Zhang, R. (2014). An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 8(5), 742-758. doi: 10.1109/JSTSP.2014.2317671
- Mao, T., Wang, Z., Wang, Q., Chen, S., & Hanzo, L. (2017). Dual-Mode Index Modulation Aided OFDM. *IEEE Access*, 5, 50-60. doi: 10.1109/ACCESS.2016.2601648
- Shi, Y., Lu, X., Gao, K., Zhu, J., & Wang, S. (2019). Subblocks Set Design Aided Orthogonal Frequency Division Multiplexing With All Index Modulation. *IEEE Access*, 7, 52659-52668. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2909911
- Shi, Y., Lu, X., Gao, K., Zhu, J., & Wang, S. (2019). Genetic Algorithm Aided OFDM With All Index Modulation. *Communications Letters*, 23(12), 2192-2195. doi: 10.1109/LCOMM.2019.2942915
- Wen, M., Zheng, B., Kim, K. J., Di Renzo, M., Tsiftsis, T. A., Chen, K., & Al-Dhair, N. (2019). A Survey on Spatial Modulation in Emerging Wireless Systems: Research Progresses and Applications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 37(9), 1949-1972. doi: 10.1109/JSAC.2019.2929453
- Wen, M., Ye, B., Basar, E., Li, Q., & Ji, F. (2017). Enhanced Orthogonal Frequency Division Multiplexing With Index Modulation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16(7), 4786-4801. doi: 10.1109/TWC.2017.2702618
- Xiao, Y., Wang, S., Dan, L., Lei, X., Yang, P., & Xiang, W. (2014). OFDM With Interleaved Subcarrier-Index Modulation. *IEEE Communications Letters*, 18(8), 1447-1450. doi: 10.1109/LCOMM.2014.2332340
- Yıldırım, M. (2020). ABC Algorithm-Based Subblocks Set Design for OFDM With All Index Modulation. *IEEE Communications Letters*, 24(12), 2926-2930. doi: 10.1109/LCOMM.2020.3019476



AA7075 Matrisli B4C+SiC Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Toz Takviyeli EEİ Yöntemiyle İşlenmesinde Boşalım Akımı ve Takviye Oranının İşlenmiş Yüzeyin Mikroyapısı ve Pürüzlülüğüne Etkisi

The Effect of Discharge Current and Reinforcement Ratio on the Microstructure and Roughness of the Machined Surface in the Machining of AA7075 Matrix B4C+SiC Reinforced Hybrid Composites by Powder Reinforced EDM Method

Gözde Keskin¹, Gökhan Küçüktürk², Muharrem Pul³, Hakan Gürün⁴, Volkan Baydaroğlu⁵

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, 06500 Ankara, TÜRKİYE

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 06500 Ankara, TÜRKİYE

³Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

⁴Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 06500 Ankara, TÜRKİYE

⁵Botaş Lng İşletme Müdürlüğü, 59760 Tekirdağ, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 26/02/2021

Kabul / Accepted: 09/03/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 23/05/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Bu çalışmada farklı takviye hacim oranlarında üretilmiş olan AA7075 matrisli B4C+SiC takviyeli hibrit kompozitlerin, Toz Katkılı Elektro Erozyon ile İşleme (TKEEİ) yöntemiyle işlenmesinde, işleme deşarj akımı ve B4C+SiC takviye oranlarının işlenmiş yüzeylerin mikroyapısına etkisi incelenmiştir. %5 B4C+%5 SiC ve %10 B4C+%10 SiC takviye oranlarında toz metalürjisi tekniğiyle üretilmiş olan AA7075 hibrit kompozit numuneler üzerinde, 2A, 4A ve 8A olmak üzere 3 farklı akım değeri uygulanarak işleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında işlenmiş yüzeylerin elektron mikroskobu görüntüleri çekilmiş ayrıca yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Deney ve incelemeler sonucunda boşalım akımının artması ve B4C+SiC takviye oranının yükselmesiyle kompozit yapının olumsuz etkilendiği, işlenen yüzeylerin pürüzlülük değerlerinin yükseldiği görülmüştür. Ancak hem yüzeylerin mikro yapısı hem de pürüzlülük değerleri üzerinde, boşalım akımının artmasının etkisi, B4C+SiC takviye oranı artışının etkisinden daha fazla olmuştur.

Anahtar Kelimeler

“AA7075/B4C+SiC Kompozit, Elektro Erozyon İşleme, Boşalım Akımı, Mikro Yapı, Yüzey Pürüzlülüğü”

Abstract

In this study, the effect of electro discharge machining and B4C + SiC reinforcement ratios on the microstructure of the machined surfaces in the machining of AA7075 matrix B4C+SiC reinforced hybrid composites with powder-mixed electro discharge machining (EDM) method was investigated. Machining experiments were carried out on AA7075 hybrid composite samples produced with powder metallurgy technique at 5% B4C+5% SiC and 10% B4C+10% SiC by applying 3 different discharge currents: 2A, 4A and 8A. In the second stage of the study, scanning electron microscopy images of the machined surfaces were taken and surface roughness measurements were made. As a result of the experiments and investigations, it was observed that the composite structure was negatively affected by the increase in the discharge current and the increase in the B4C+SiC reinforcement ratio, and the roughness values of the machined surfaces increased. However, the effect of increasing the discharge current on both the microstructure of the surfaces and the roughness values was more than the effect of the increase in the B4C+SiC reinforcement ratio.

Key Words

“AA7075/B4C+SiC Composite,, Electro Discharge Machining, Discharge Current, Micro Structure, Surface Roughness”

1. Giriş

Bilim ve teknolojinin hızla ilerlemesiyle, üstün özelliklere sahip mühendislik malzemelerinin kullanımı zorunlu hale gelmiştir. Bununla birlikte, gelişmiş özellikleriyle öne çıkan mühendislik malzemelerinin geleneksel imalat yöntemleriyle işlenmesinde birçok zorluk ile karşılaşmaktadır. Yüksek boyutsal hassasiyet, karmaşık geometri, üstün yüzey kalitesi, düşük yüzey pürüzlülüğü gerektiren ihtiyaçların ortaya çıkması bu tür taleplerin karşılanmasına yönelik imalat yöntemlerini önemli hale getirmektedir. Günümüzde kompozit malzemeler arasında yaygın olarak kullanılan metal matrisli kompozitlerin (MMK) geleneksel imalat yöntemleriyle işlenmesinde de pek çok güçlük ile karşılaşmaktadır (Garg et al., 2010; Mardi et al., 2017; Sezen 2018; Karakoç 2017).

MMK malzemelerde matris malzemesi olarak, alüminyum, titanyum, bakır ve magnezyum kullanılabilir. Alüminyum düşük yoğunluk, korozyon direnci ve yüksek mukavemete sahip olması nedeniyle en yaygın olarak kullanılan matris malzemesidir. MMK malzeme sınıflandırmalarından biri olan alüminyum esaslı kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak en çok tercih edilen seramik partiküller B₄C, SiC, Al₂O₃ ve Si₃N₄ 'dir (Garg et al., 2010; Mardi et al., 2017; Sezen 2018; Karakoç 2017). Sert seramik takviyelerin işlemede oluşturduğu değişken yükler nedeniyle aşırı takım aşınmasına yol açması geleneksel yöntemler ile işlemede istenilen toleransların ve yüzey özelliklerinin elde edilememesine yol açmaktadır. Takım aşınmasının ana sebebi, doğrudan temas nedeniyle takımda termal ve mekanik yük meydana gelmesidir. Böylece aşınma süreci hızlanmakta ve takım ömrü kısalmaktadır (Mardi et al. 2017). Kompozit malzemelerin işlenmesinde sıklıkla karşılaşılan bu tür problemlerin üstesinden gelebilmek için elektro erozyon ile işleme (EEİ), lazer ışını ile işleme, aşındırıcı su jeti ile işleme, elektrokimyasal işleme ve ultrasonik işleme gibi geleneksel olmayan imal usulleri yöntemlerine başvurulmaktadır (Mardi et al. 2017).

Yüksek mukavemet, sertlik ve aşınma direncine sahip MMK malzemelerin geleneksel imalat yöntemleri ile işlenmesinin zorlukları nedeniyle bu çalışmada başvuru geleneksel olmayan yöntemlerden olan EEİ yönteminin toz katkılı uygulanabilirliğinin deneysel olarak incelenmesi hedeflenmiştir. Bu konuda literatürde yer alan bazı çalışmalar mevcuttur (Sidhu et al., 2014; Mohanty et al., 2019; Kolli and Kumar 2015). Kompozit yapının kalitesini etkileyen matris malzemesi ile takviye arasındaki ıslanabilirlik seviyesi ve takviye partiküllerinin homojen dağılımı durumunun toz katkılı elektro erozyon işleme (TKEEİ) ile işleme performansı üzerine etkilerinin gözlemlendiği bu çalışmada dielektrik sıvı içerisine nano boyutta grafit tozu ilavesi ile başarılı ve kararlı işlemenin sağlanabileceği ve işleme performansının geliştirilebileceği düşünülmüştür. Bu amaçla %5 B₄C+%5 SiC ve %10 B₄C+%10 SiC takviye edilmiş Al7075 matrisli kompozitlerin EEİ'de boşalım akımı ve takviye oranlarının işlenen kompozitin yüzey yapısı üzerindeki rolü araştırılmıştır.

2. Deneysel Çalışma

Deneysel çalışmada kullanılan AA7075 matrisli B₄C+SiC takviyeli hibrit kompozitler toz metalürjisi yöntemiyle %5 B₄C+%5 SiC+%90 AA7075 ve %10 B₄C+%10 SiC+%80 AA7075 olmak üzere iki farklı takviye hacim oranında üretilmiştir. Kompozitlerin üretiminde 700 MPa sıkıştırma basıncı, 550 °C sinterleme sıcaklığı ve 150 dakika sinterleme süresi uygulanmıştır (Baydaroğlu 2018). Yaklaşık olarak 30 mm çapında ve 20 mm yüksekliğinde üretilmiş olan kompozit deney numunelerinin üretiminde kullanılan matris malzemesi AA7075 tozu ve takviye elamanları B₄C ile SiC'e ait bazı teknik özellikleri gösteren değerler Tablo 1'de verilmiştir.

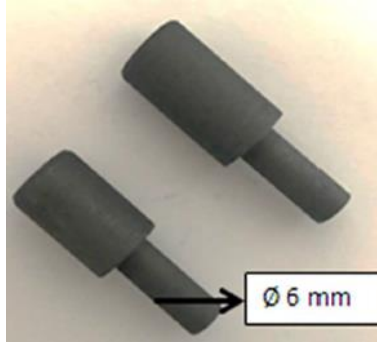
Tablo 1. Deney malzemelerinin teknik özellikleri

AA 7075'in özellikleri							
% Fe	% Si	% Cu	% Mn	% Mg	% Zn	% Ti	% Cr
0,50	0,40	1,21-2,0	0,30	2,1-2,9	5,1-6,1	0,2	0,18-0,28
Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime noktası (°C)		Parçacık şekli		Isıl iletkenlik (W/mK 20°C)		
2,81	635		Yuvarlak				
B4C'nin özellikleri							
		% B	% C				
		78,28	21,72				
Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime noktası (°C)		Parçacık şekli		Isıl iletkenlik (W/mK 20°C)		
2,52	2760		Köşeli		30-900		
SiC'nin özellikleri							
% Si	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% SiO ₂	% P ₂ O ₅	% SO ₃	% C	
61-66	0,7-1,2	0,6-1,1	0,02	0,07	0,3	22-26	
Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime noktası (°C)		Parçacık şekli		Isıl iletkenlik (W/mK 20°C)		
3,21	2730		Köşeli		90-160		

TKEEİ deneylerinde 6 mm çapında grafit elektrot kullanılmıştır. Çubuk grafit formunda temin edilen grafit elektrotların takım tutucuya kolaylıkla bağlanabilmesi için Şekil 1’de gösterilen boy ve çap ölçülerine getirilmiştir. Grafit, elektriksel direncinin düşük olması ve üstün yüzey kalitesine olanak sağlaması nedeniyle tercih edilmiştir. Dielektrik sıvı olarak gaz yağı kullanılmıştır (Keskin 2019). Gaz yağı düşük viskozite ve yüksek püskürtme kalitesi özellikleri sunmaktadır (Kumar et al., 2017). Dielektrik sıvı uygulaması yanal püskürtme biçiminde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deneylerde toz partikül büyüklüğü 50 nm den daha düşük olan nanografit tozu kullanılmıştır. EEİ deney parametreleri Tablo 2’de verilmektedir.

Tablo 2. TKEEİ Deney Parametreleri

Boşalım Akımı (A)	2, 4, 8
Vurum Süresi (μ s)	8
Bekleme Süresi (μ s)	10
Gerilim (V)	60-80
Kutuplama	Elektrot (-), İş parçası (+)
Elektrot Cinsi	Grafit
Dielektrik püskürtme	Yandan püskürtme
Toz katkısı ve derişimi	Grafit tozu (15 g/L)



Şekil 1. Grafit elektrot (Keskin 2019)

EEİ deneyleri, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Laboratuvarı’nda bulunan Charmilles D20 marka elektro erozyon tezgâhında gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).



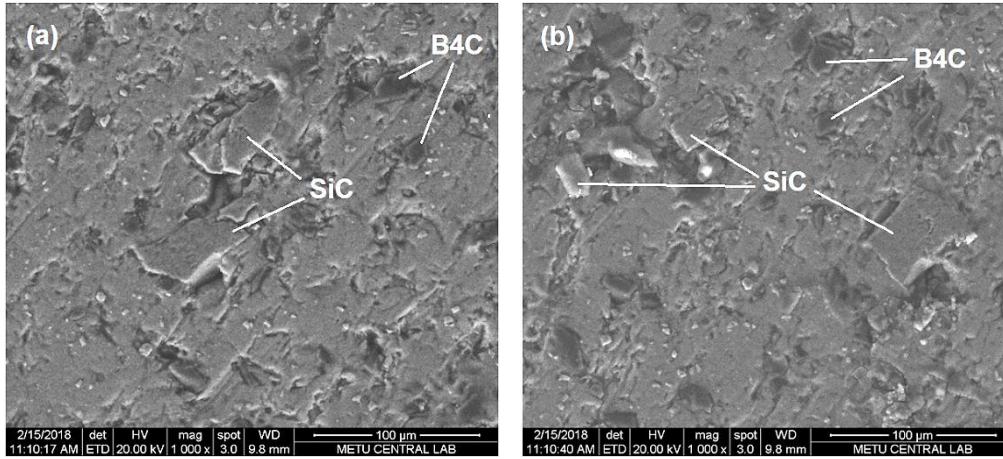
Şekil 2. EEİ deneylerinin yapıldığı tezgah (Keskin 2019)

İş parçasını işleme derinliği sabit 2 mm olarak belirlenmiştir. Hedeflenen işleme derinliğine ulaşıldığında, otomatik olarak delik delme işlemi sonlandırılmıştır. Bu esnada işleme süresi kronometre ile tutulmuştur. Her bir delik delme işleminde ayrı grafit elektrot kullanılmıştır. İşleme deneyleri tamamlanan hibrit kompozit numunelerin Form Talysurf PGI marka ölçüm cihazı kullanılarak yüzey pürüzlüğü ölçümleri yapılmıştır. Mikro yapı incelemesi ise Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü SEM Laboratuvarı'nda bulunan taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca üretimi yapılan kompozit numunelerin Arşimet prensibi kullanılarak teorik yoğunluk değerleri ölçülerek porozite miktarları belirlenmiştir.

3. Deney Sonuçları ve Tartışma

3.1. Mikroyapı İncelemesi

İlk olarak kompozit yapıyı incelemek amacıyla toz metalurjisi yöntemiyle %5 B4C+%5 SiC+%90 AA7075 ve %10 B4C+%10 SiC+%80 AA7075 takviye hacim oranlarında üretilmiş olan kompozit deney numunelerinin mikroyapılarını gösteren SEM mikroskobu görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. a) %5 B4C+%5 SiC+%90 AA7075 b) %10 B4C+%10 SiC+%80 AA7075 (Baydaroğlu 2018)

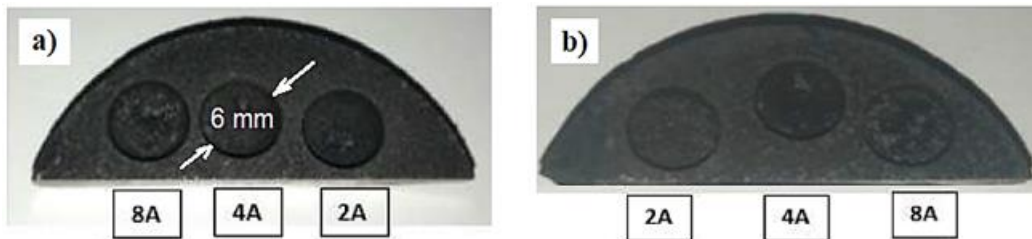
Şekil 3'teki SEM görüntülerine bakıldığında, takviye elemanlarının homojen olmayan bir dağılım sergilediği görülmektedir. Ayrıca takviye parçacıklarının yer yer topaklandığı ve bu bölgelerin yanında gözeneklerin meydana geldiği görülmektedir. Arşimet prensibine göre ölçülen yoğunluk ve gözeneklilik değerleri Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo3. SiC+B4C/Al7075 kompozitlerde ölçülen yoğunluk ve gözeneklilik miktarları (Baydaroğlu 2018)

	%5 SiC+%5 B4C	%10 SiC+%10 B4C
Yoğunluk (%)	94,52	90,24
Gözeneklilik (%)	5,48	9,76

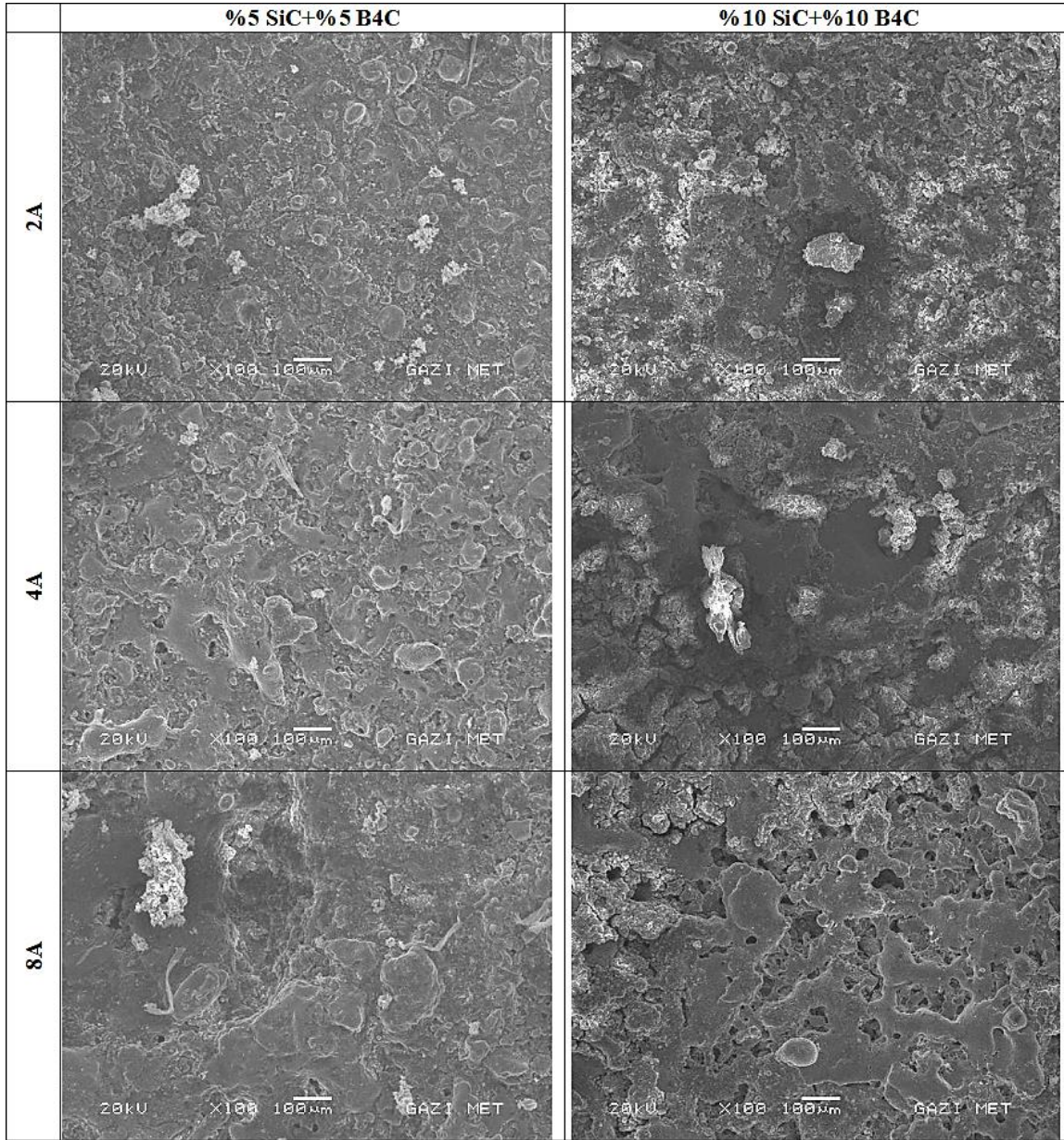
Takviye topaklanmasının olduğu bölgelerde matris malzemesi AA7075 ile takviye elemanları B4C ve SiC arasında yeterli seviyede ıslatmanın olmadığı ve matris-takviye ara yüzeylerindeki bağlanmanın zayıf veya hiç olmadığı anlaşılmaktadır. Yukarıda zikredilen olumsuz mikroyapı özellikleri, bu tür kompozit yapılarda sıklıkla karşılaşılan ve literatürde yer alan bir sonuçtur (Pul ve Baydaroğlu 2020; Pul 2018).

Toz metalurjisi tekniği ile üretilen SiC+B4C parçacık takviyeli Al7075 matrisli kompozit deney numunelerinin grafit elektrot ile 2A, 4A ve 8A boşalım akımlarında TKEEİ yöntemiyle işlenmesinden sonra elde edilen kör delikler ve deney numunelerinin genel görünüşleri Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. a) %5 B4C+%5 SiC+%10 AA7075 deney numunesi, b) %10 B4C+%10 SiC+%10 AA7075 deney numunesi (Keskin 2019)

İşleme deneyleri tamamlandıktan sonra, %5 SiC+%5 B4C ve %10 SiC+%10 B4C takviyeli AA7075 kompozit malzemelerin işlenmiş yüzeylerinden çekilen 100x büyütmedeki SEM görüntüleri Şekil 5'te toplu olarak gösterilmektedir.



Şekil 5. %5 SiC+%5 B4C ve %10 SiC+%10 B4C takviyeli AA7075 kompozitlerin SEM görüntüleri (Keskin 2019)

EEİ işleme operasyonlarında boşalım akımının artmasıyla oluşan yüzey hasarlarının da artması beklenir. Akım şiddetinin artması, iş parçası yüzeyine daha yoğun bir enerji boşalımının olmasına yol açmakta ve bunun sonucu olarak yüzeyden daha fazla talaş kaldırılmaktadır (Keskin 2019). Şekil 5'teki SEM görüntülerine bakıldığında, boşalım akımının 2A'den 8A'ye çıkmasıyla işlenmiş yüzeylerdeki deformasyonunda arttığı görülebilmektedir. Bu deformasyon hem parçacık kopması hem de malzemenin erimiş halde bir görüntü sergilemesiyle karşımıza çıkmaktadır. Şekil 5'te yer alan her iki kompozit malzemenin de 8A ile işlenmiş yüzey görüntülerinde, erimiş malzeme bölgeleri çok bariz olarak görülmektedir. Ayrıca, yüzeyden kaldırılan talaş miktarının artması, aynı zamanda yüzey pürüzlülüğünü de olumsuz yönde etkileyebileceği düşünülebilir.

Şekil 5'teki SEM görüntülerine toplu olarak bakıldığında, %SiC+%B4C oranının artmasıyla yüzey mikro yapısının daha gözenekli hale gelmiş olduğu da anlaşılmaktadır. İşleme sırasında AA7075 matris içerisine gömülü haldeki SiC ve B4C takviye parçacıkları koparak uzaklaşmıştır. Doğal olarak %10 SiC+%10 B4C takviyeli numuneden %5 SiC+%5 B4C takviyeli numuneye göre daha fazla takviye parçacığı kopmuştur. Kopan takviye parçacıklarının yeri boşluk olarak karşımıza çıkmaktadır. Aynı zamanda yüksek takviye oranında daha fazla takviye toplanması meydana geldiği daha önce ifade edilmişti. Toplanmış bölgelerde yoğun ve bir arada bulunan takviye parçacıklarının büyük kütleler halinde kompozit yapıdan uzaklaştığı anlaşılmaktadır. Nitekim Şekil 5'teki 4A boşalım

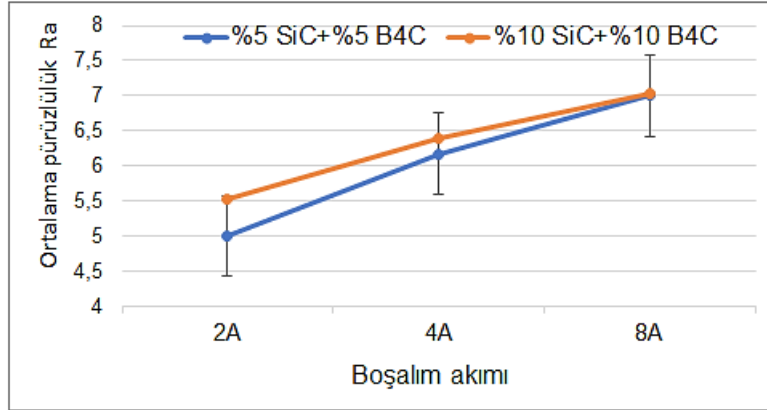
akımında işlenmiş olan %10 SiC+%10 B4C takviyeli numunenin SEM görüntüsüne bakıldığında büyük bir gözenğin oluştuğu görülmektedir.

3.2. Yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi

Tablo 4'te %5 SiC+ %5 B4C ve %10 SiC+ %10 B4C takviyeli AA7075 kompozitlerin yüzey pürüzlülüğü değerleri, Şekil 6'da ise pürüzlülük değerlerine göre çizilen grafik verilmektedir.

Tablo 4. SiC+B4C/Al7075 kompozitlerde ölçülen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri

Akım (A)	%5 SiC+%5 B4C			%10 SiC+%10 B4C		
	2A	4A	8A	2A	4A	8A
Ra (µm)	5,00	6,17	7,00	5,53	6,39	7,04



Şekil 6. SiC+B4C takviyeli kompozitlerde boşalım akımının Ra değerine etkisi

Ölçümler sonucunda elde edilen en yüksek pürüzlülük değeri 8A boşalım akımında işlenen %10 SiC+%10 B4C takviyeli kompozitte 7,04 µm olarak ölçülürken, en düşük pürüzlülük değeri 2A boşalım akımında işlenen %5 SiC+%5 B4C takviyeli kompozitte 5,00 µm ölçülmüştür. Bu genel sonuca göre, boşalım akımının ve SiC+B4C takviye oranının yükselmesiyle yüzey pürüzlülük değerlerinin de yükselmiş olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.

Kompozit malzemeler kendi içinde değerlendirildiğinde ise, %10 SiC+%10 B4C takviyeli kompozitlerin, %5 SiC+%5 B4C takviyeli kompozitlere kıyasla yüzey pürüzlülüğü aralığının daha düşük olduğu görülmektedir. Dikkat çeken diğer husus ise boşalım akımı değeri yükseldikçe her iki kompozit malzemeden elde edilen pürüzlülük değerlerinin biri birine yaklaşıyor olmasıdır. Hatta 8A boşalım akımında neredeyse aynı pürüzlülük değeri elde edilmiştir.

TKEEİ yönteminin esas gereği boşalım akımının artmasına bağlı olarak, ergime esnasında iş parçası ile elektrot arasında yüksek sıcaklık meydana gelir ve malzemeler ve ısı dielektrik sıvı ile kolayca uzaklaştırılmaktadır. Rastgele tekrarlı ve düzenli devam eden boşalımlar sonrası metal malzemelerin işlenmesinde, parça yüzeyinde krateri bir yapı oluşumuna sebep olur. EEİ lenmesinde, boşalım akımı arttıkça daha geniş ve derin kraterler oluşması işlemin doğal bir sonucu olarak kabul edilir. Ancak ısı iletkenliği ve elektriksel iletkenliği düşük seramik ve seramik takviyeli metal matrisli malzemelerin TKEEİ ile işlenmesinde durum biraz daha farklıdır. Elde edilen SEM fotoğraflarında yüzey görüntülerinin metal bir malzemedeki gibi yüzeyde krateri görüntüden çok düzensiz katman şeklinde katılma görüntüleri elde edilmiştir. Akım değerinin atması ile bu düzensizliklerin arttığı görülmektedir. Toz takviyesi ile kararlı boşalımlar ile işlemin devamı sağlanmış ancak boşalım düzensizlikleri sonucu oluşan kalıntı ısının atlamaması ile ergiyik malzemenin kontrolsüz bir şekilde yüzeye yeniden bağlanması sonucu katman katman düzensiz katılmalarda oluşmuştur (Şekil 5). Ölçümler sırasında yüzey pürüzlülük cihazının hareketli probunun bu farklı derinliklere sahip düzensiz girinti ve çıkıntılara girip çıkması söz konusudur. Dolayısıyla oluşan kraterlerin büyüklüğü ve derinliği yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli sebeptir. Sonuç olarak bu kompozit malzemelerle yapılan çalışmada yüzey pürüzlülüğü üzerinde, boşalım akımının etkisinin takviye oranının etkisinden daha fazla ön plana çıktığı söylenebilir. Benzer sonuç literatürdeki bir çalışmada yer almaktadır (Kumar ve Davim 2011).

4. Sonuçlar

%5 SiC+%5 B4C ve %10 SiC+%10 B4C hibrit kompozit malzemeler, toz metalurjisi ile başarılı bir şekilde üretilmiştir. TKEEİ kullanarak iki tip hibrit alüminyum metal matris kompozitlerin işlenebilirliğini farklı akım parametreleri ile yüzey karakteristiklerine etkisini incelenmiştir. Deneysel verilerle aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

Takviye/hacim oranı yüksek hibrit kompozit malzemelerin işlenmesinde bile kararlı bir işleme rejimi olması dielektrik sıvı içerisine nano boyutlu grafit tozlarının ilavesiyle mümkün olabilmektedir. İşlenen yüzey görüntülerinin metal bir malzemeyi işleme sonrası elde

edilen krateri görüntüden çok düzensiz katman şeklinde katılaşma görüntüleri elde edilmiştir. Akım değerinin atması ile bu düzensizliklerin arttığı görülmektedir. Her ne kadar nano grafit takviyesi ile işlemenin sürekliliği sağlanmış ise de elektriksel iletken olmayan takviye malzemenin etkisiyle oluşan boşalım düzensizlikleri oluşmuş yüzeydeki kalıntı ısının atılmaması sonucu ergiyik atık malzeme dielektrik sıvı ile kolayca uzaklaştırılmış ve yüzeyde düzensiz katılaşmalar formlanmış. Darbe akımındaki artış, boşalım enerjisini arttırdığı için düzensiz katılaşma daha da artmıştır. Bu da yüzey pürüzlüğünde takviye hacim oranındaki artışın etkisinden daha çok akım değerindeki artışın neden olumsuz bir sonuç doğurduğunu açıklamaktadır.

Referanslar

- Baydaroğlu, V. (2018). Balistik Malzeme Üretimine Yönelik B4C + SiC Takviyeli Al 7075 Kompozitlerde Optimum Katkı Oranının Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 30-101.
- Garg, R. K., Singh, K. K., Sachdeva, A., Sharma, V.S., Ojha, K. and Singh, S. (2010). Review of research work in sinking EDM and WEDM on metal matrix composite materials. *International Journal Advanced Manufacturing Technol*, 50, 611-624. doi: 10.1007/s00170-010-2534-5
- Karakoç, H. (2017). TM Yöntemi ile B4C Takviyeli AA6061 Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretimi, Mekanik Özelliklerinin ve Balistik Performansının İncelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 15-36.
- Keskin, G. (2019) SiC, B4C ile Takviyelendirilmiş Al7075 Alaşımının Toz Katkılı Elektro Erozyon İle İşlenmesinde İşleme Parametre Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-107.
- Kolli, M. and Kumar, A. (2015) Effect of dielectric fluid with surfactant and graphite powder on Electrical Discharge Machining of titanium alloy using Taguchi method. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18, 524-535.
- Kumar, H. and Davim, J.P. (2011). Role of powder in the machining of Al-10%SiCp metal matrix composites by powder mixed dielectric discharge machining. *Journal of Composite Materials*, 45(2), 133-151. doi:10.1177/0021998310371543
- Kumar, D., Kumar, K., Payal, H.S., Mer, K.K.S. (2017). A state-of-the-art review on dielectric fluid in electric discharge machining: uses and its effects. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(7), 1185-1190.
- Mardi, K.B., Dixit, A.R. and Mallick, A. (2017). Studies on non-traditional machining of metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 4, 8226-8239. doi:10.1016/j.matpr.2017.07.165
- Mohanty, S., Singh, S.S., Routara, B.C., Nanda, B. K., Nayak, R.K. (2019) Comparative study on machining of AlSiCp metal matrix composite using Electrical discharge machine with and without nano powder suspension in dielectric. *Materials Today: Proceedings*, 18,4281-4289.
- Sezen, G. (2018). Metal Matrisli Kompozit Malzemelerde Takviye Malzemesinin Yüzey Özelliklerinin İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 6-14.
- Sidhu, S.S., Ajay Batish, A., Kumar, S. (2014) Study of Surface Properties in Particulate-Reinforced Metal Matrix Composites (MMCs) Using Powder-Mixed Electrical Discharge Machining (EDM). *Materials and Manufacturing Processes*, 29, 46-52. doi: 10.1080/10426914.2013.852211
- Pul, M., Baydaroğlu, V. (2020) B4C/SiC katkıli alüminyum esaslı kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi ve balistik performanslarının modellenmesi. *Politeknik Dergisi*, 23(2), 382-392.
- Pul, M (2018) Effect of B4C Reinforcement Ratio and Sintering Temperature on the Mechanical Behavior in Al-B4C Composites, *Science of Sintering*, 50(1), 51-61.



Tarihi Hundi Hatun (Kunç) Köprüsünün Artan Trafik Yükü Altında Davranışının İncelenmesi

Investigation of Behaviour of Historical Hundi Hatun (Kunç) Bridge Under Increasing Traffic Load

Burçin Şenol Şeker*¹, Murat Gökçe¹

¹Amasya Üniversitesi Mimarlık Fakültesi, 05200 Amasya, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 10/11/2020

Kabul / Accepted: 19/03/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 23/05/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Amasya kentinde yer alan Hundi Hatun (Kunç) köprüsünün artan trafik yükleri etkisi altındaki davranışı bu çalışmada detaylı olarak incelenmiştir. Köprü, halihazırda taşıt trafiğine açık durumda olup, şehrin en işlek mevkilerinden birinde bulunmaktadır. Bundan dolayı köprü, oldukça fazla trafik yüküne maruz kalmaktadır. Yakın zamanda şehir içinde açılan tünelden hasıl olan trafik yükü de köprüye doğru iletilmekte ve köprüünün her iki yakasında trafik sıkışıklığına neden olarak, köprü üzerinde uzun süre araç beklemesine neden olmaktadır. Bu yükün köprü üzerinde meydana getirdiği olumsuz durum bu çalışmada, farklı araç yükleri dikkate alınarak incelenmiştir. Malzeme modeli olarak Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılmıştır. Köprü üzerinde mevcut olan her iki şeritin en olumsuz durum olan tamamen dolu olmasını durumuna göre analizler gerçekleştirilmiştir. Araç yükü olarak otomobil, minibüs, kamyonet ve otobüs yükleri dikkate alınmış ve meydana gelen gerilme ve deformasyonlar belirlenmiştir. Ayrıca meydana gelen deformasyonların sınır değeri aşmadığı, oluşan çekme gerilmelerinin basık kemer mesnet ve tepe noktalarında, ayrıca köprü taşıyıcı kemerleri üst kısmındaki yan duvarlarda yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Bunlara ek olarak rijit blok analizi yöntemini kullanan Limitstate: Ring yazılımı ile de analizler gerçekleştirilmiş ve yenilme mekanizmaları ve buna sebep olan minimum dingil yükleri de tespit edilmiştir. Çalışmadan elde edilen bulguların ilerdeki restorasyon çalışmaları için yol gösterici olması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler

"Hundi hatun (kunç) köprüsü, artan trafik yükü, mohr coulomb malzeme modeli, amasya"

Abstract

The behavior of Hundi Hatun (Kunç) Bridge located in Amasya city under the effect of increasing traffic loads has been examined detailed in this study. The bridge is currently open to vehicle traffic and is located in one of the busiest locations in the city. Therefore, the bridge is exposed to a huge traffic load. The traffic load resulting from the tunnel opened in the city recently is transferred towards the bridge and causes traffic congestion on both sides of the bridge, causing the vehicle to wait on the bridge for a long time. The negative situation caused by this load on the bridge has been examined in this study, considering different vehicle loads. Mohr-Coulomb material model is used as the material model. Analyzes have been carried out according to the most unfavorable situation that both lanes on the bridge is full. Automobile, minibus, van and bus loads were taken into consideration as vehicle load and the resulting stress and deformations were determined. In addition, it has been determined that the deformations that occur do not exceed the limit value, maximum tensile stresses are concentrated on the flattened arch support and around key stone points, and also on the side walls of the upper part of the arches. In addition to these, analyzes were carried out with the Limitstate: Ring software, which uses the rigid block analysis method, and the failure mechanisms and the minimum axle loads that cause failure were determined. The findings obtained from the study are aimed to be a guide for future restoration studies.

Key Words

"Hundi hatun (kunç) bridge, increasing traffic load, mohr – coulomb material model, amasya"

1. Giriş

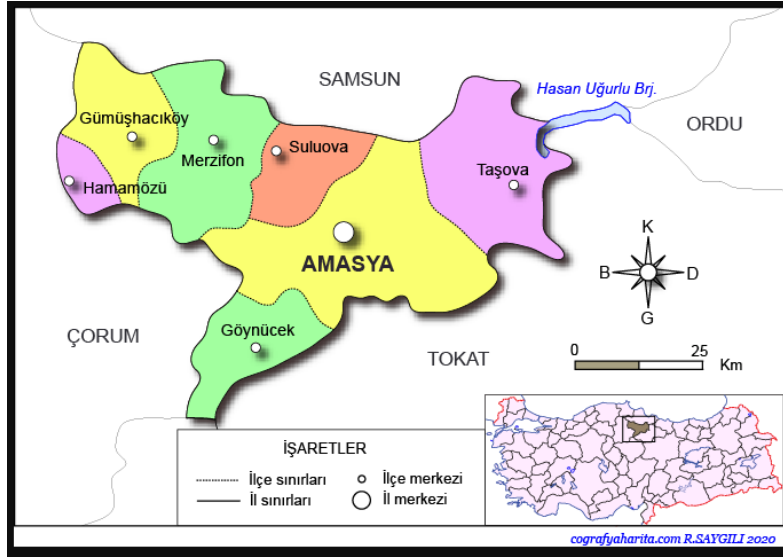
Tarihi doku, geçmişten günümüze ulaşmış yerleşimleri ve eserleri kapsamaktadır. Büyük bir özenle inşa edilmiş olan bu tarihi eserler, içerdikleri farklı üsluplar ve biçimler ile tarihi dokuyu oluşturmaktadırlar. Böylece meydana gelen kültürel miraslar, toplumların kimliğinin ve sürekliliğinin sembolü olmaktadır. Hatta bu miras; tarihsellik yanında, sanatsal, sosyal, ekonomik, dini, hatta politik birçok değeri de içermektedir. Bu sebeple bu eserlerin, özgün halleriyle koruyup gelecek nesillere aktarılması toplumsal bir zorunluluktur. Türkiye coğrafyası, farklı kültürleri bir arada barındırmaktadır. Bu durumda, bu eserlerin gelecek nesillere aktarılmasında bu bölge insanına dünya çapında bir sorumluluk yüklemektedir. Bu yapıların korunması ile, ekonomik ve tarihsel süreklilik sağlanmış olacaktır (Meriç et. al. (2019)). Bu açıdan bakıldığında, tarihi dokuyu oluşturan bütün bu eserlerin zamanla bozulmalarının ve yıkılmalarının önüne geçilmesi çok önem arz etmektedir.

Literatürde, tarihi yığma köprüleri ile ilgili yapılmış farklı çalışmalar mevcuttur. (Conde et.al. 2016) yaptıkları çalışmada, tarihi bir köprünün çökme yüküne, dolgu malzemesinin ve kemerlerin geometrisinin etkilerini araştırmışlardır. Limit analiz yöntemi ile, geometrik nonlineer etkilerde analizlerde gözönüne alınmıştır. Tarihi köprülerin sismik değerlendirilmelerinin ve performanslarının belirlendiği yayınlarda literatürde mevcuttur (Karaton et. al. (2009)). Tubaldi et al. (2020) çok açıklıklı yığma köprü üzerinde geometrik ve mekanik özelliklerin köprü davranışına etkisini, köprü geometrisinin parametrik olarak değişimini ve köprü ayaklarının çökmesini de analize katarak araştırmışlardır. (Kamiński, 2018), yığma köprüler üzerinde nihai sınır durum analizi ile sınır durum analiz yöntemlerini uygulamıştır. Çalışmada yöntemler tanıtılmış, yığma köprüler üzerindeki potansiyelleri ve etkileri tartışılmıştır. (Pepi et al. (2017) yaptıkları çalışmada, ağır hasarlı bir köprü üzerine geometrik araştırmalar, dinamik testler gerçekleştirmişler, köprünün sayısal modelini oluşturarak, köprünün yapısal performansını değerlendirmişlerdir. Tarihi yığma köprülerin rehabilitasyonunu ve renovasyonunu inceleyen araştırmalar (Paeglitis et. al. (2013); Rodrigo et. al. (2015); Rodrigues et. al. (2008) literatürde mevcut olduğu gibi, probabilistik güvenliğini inceleyen tarzda çalışma (Pouraminian et al. (2020) da bulunmaktadır. Yığma köprüler üzerinde farklı türde yapılan araştırmalar da literatürde mevcuttur (Ataei et.al. (2017); Augusthus et.al. (2020); Hokeleki et.al. (2019); Kindij et.al.(2013); Rahman et.al. (2010), Onat ve Yön (2018), Özmen ve Sayın (2018), Kolla et.al. (2021) ve Nobile ve Bartolomeo (2015). Anadolu’da tarih öncesinden günümüze kadar birçok toplum tarafından, ulaşım problem ve ihtiyaçlarının çözülebilmesi amacıyla bazı yapılar inşa edilmiştir. Bu problemlerden belki de en büyüğü olarak gördükleri, büyük açıklıklı nehirlerin ve vadilerin geçilebilmesi için ise, kemer köprüler yapılmış ve o zamanki koşullara göre dizayn edilmişlerdir. Anadolu tarihinde kemer köprüler fazla sayıda inşa edilmişlerdir. Tarihi kemerli köprülere özellikle Osmanlı ve Selçuklu İmparatorluğu döneminde çokça rastlanılmaktadır. Anadolu’da bulunan tarihi kemerli köprülerin birçoğu zaman içerisinde depremlere, yangınlara maruz kalmıştır. Ayrıca, coğrafi konumları itibariyle savaşlardan da ciddi oranda etkilenmişler ve zarar görmüşlerdir. Meydana gelen bu zararlar kimi zaman onarılabılır ölçülerde kalsa da kimi zaman köprülerin yıkılmasına neden olmuşlardır. Medeniyetin beşiği olan Anadolu’da, geçmişten günümüze miras kalan bu köprüler hem kırsal hem de kentsel alanlarda, ülke ulaşım ağının bir parçası konumunda hala hizmet vermekteler. Bunların yanı sıra, inşa edilirken kullanılan yapı malzemelerin ömürlerini tamamlaması veya tasarlandıkları dönemde dikkate alınan hizmet yükleri ile günümüzde teknolojinin gelişimi ile meydana gelen yükler arasındaki belirgin farklar bu köprülerin zarar görmesine ya da tamamen kullanılamaz hale gelmesine sebep olabilmektedir. Ancak günümüz koşullarındaki araçların kapasiteleri, yoğunlukları ve tonajları, bu köprülerin günümüz koşullarında tekrar değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır (Kaya, 2018).

Bu çalışmada da Amasya ilinde bulunan tarihi Hundi hatun köprüsünün artan araç yükü altında analizi yapılmış, taşıma kapasitesi ile yapıda oluşabilecek olası hasar durumları araştırılmıştır.

2. Hundi Hatun (Kunç) Köprüsü Tarihi ve Mimari Özellikleri

Amasya’da, (Şekil 1) güneybatı-kuzeydoğu yönünde akan Yeşilirmak, kenti iki bölgeye ayırmaktadır. Bu nedenle, bu iki ayrı kesimin birbirine bağlantısının sağlanabilmesi için, tarih boyunca nehir üzerinde muhtelif yerlere köprüler inşa edilmiştir. Bu köprülerden biri olan Hundi Hatun Köprüsü, şehrin doğusunda, Yeşilirmak üzerinde bulunmaktadır. Güneyinde Bayezid Paşa Camii, kuzey tarafında Büyük Ağa medresesi bulunmaktadır. Sultan Mesut’un kızı, Hundi Hatun tarafından inşa ettirilmiştir. 1900 ve 1959 yıllarında onarım görmüştür. 4 gözlü, basık yuvarlak kemerlidir. Boyu 67 m, eni 8 m ve yüksekliği 10,50 m dir (Çulpan, 2002). Köprü genel görünümü Şekil 2 de verilmektedir.



Şekil 1. Türkiye Haritası ve Amasya Şehir Konumu (http://cografyaharita.com/haritalarim/41_amasya_ili_haritasi.png)



Şekil 2. Hundi Hatun (Kunç) Köprüsü Mansap ve Memba Görünümleri

3.Hundi Hatun Köprüsü Sonlu Elemanlar Modeli ve Malzeme Özellikleri

3.1. Sonlu Elemanlar Modeli

Tarihi eserler farklı malzemelerin karışımı ile inşa edilmiş yapı türleridir. Yapının bazı bölgeleri taş, diğer kısımları tuğladan olabilmektedir. Genellikle bağlayıcı malzeme de harç olmaktadır. Bütün bu farklı malzeme türlerinin sonlu elemanlar ortamında modellenebilmesi için mikro, basitleştirilmiş mikro ve makro modelleme teknikleri kullanılmaktadır. Makro modelleme tekniğinde, taş ve harç elemanları homojenleştirilmiş bir halde tek malzeme özelliği olarak ele alınmaktadır (Karaton, 2017). Bu çalışmada, makro modelleme tekniği kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

3.2. Malzeme Özellikleri

Çalışma kapsamındaki tarihi köprüde kullanılan ana malzeme, köprü kemerleri ve yan duvarları için kumtaşıdır. İç kısımda ise dolgu malzemesi bulunmaktadır. Köprüde kullanılan malzeme mekanik özellikleri, aynı şehirde bulunan bir diğer tarihi köprü üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçları alınarak belirlenmiştir. Bu deney sonuçlarına göre, taş malzeme için ortalama basınç dayanımı 41,46 MPa, birim hacim ağırlığı ise 2646 kg/m³ olarak tespit edilmiştir (Çakır et. al., 2015). Harç için ise, basınç dayanımı 6 MPa

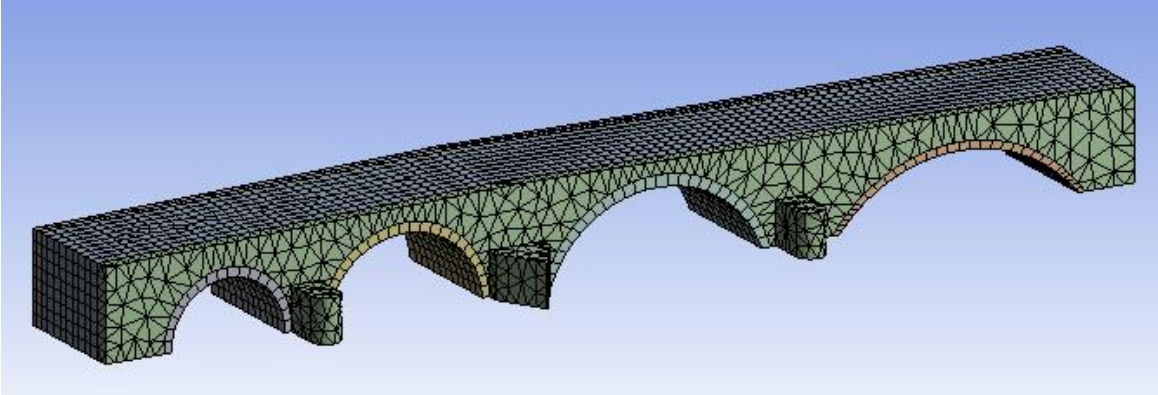
olarak alınmıştır (Altaş et. al. 2012). İç kısımdaki dolgu malzeme için ise, elastisite modülü $E = 500$ MPa, birim hacim ağırlığı 1800 kg/m^3 olarak alınmıştır (Karaton, 2017). Duvar çekme dayanımı, basınç dayanımının %10 u olarak alınmıştır. Bu bilgilere göre belirlenen (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, 2019), malzeme mekanik özellikleri Tablo 1 de gösterilmiştir.

Tablo 1. Köprüde Kullanılan Homojenleştirilmiş Malzemelerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Köprü bölümü	Elastisite modülü (MPa)	Poisson oranı	Birim hacim ağırlığı (N/m^3)	Ortalama basınç dayanımı (MPa)	Ortalama çekme dayanımı (MPa)
Kemerler ve yan duvarlar	8110	0,2	26460	8,11	0,811

4.Yapısal Analizler

Oldukça kompleks geometriye ve malzeme özelliğine sahip olan tarihi yapıların incelenmesinde sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan programlar günümüzde geniş çaplı olarak kullanım alanı bulmaktadırlar. Bu programlar sayesinde, tarihi yapıların statik ve dinamik yükler altında genel davranışı ve kritik bölgeleri tespit edilebilmektedir. Bu çalışmada oluşturulan köprü üç boyutlu modeli, ANSYS (ANSYS, 2019) ortamında lineer ve lineer olmayan analizlere tabi tutulmuştur. Lineer analizler için, her düğüm noktasında üç serbestlik derecesine sahip olan Solid 186 eleman tipi kullanılmıştır. Sayısal model toplamda 5224 eleman ve 24621 düğüm noktasından oluşmaktadır. Tarihi köprünün sonlu eleman modeli Şekil 1 de görülmektedir.



Şekil 3. Hundi Hatun Köprüsü Sonlu Eleman Modeli

Sayısal analizler için makro modelleme tekniği kullanılmıştır. Bu teknikte, yapıyı oluşturan birim elemanları ve harç birlikte tek bir malzeme olarak düşünülür ve bu yeni elemana birimlerin dayanımına bağlı olarak malzeme özellikleri atanmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemini kullanan bilgisayar programları için analiz süresini kısalttığından dolayı tercih edilen bir yöntemdir (Karaton, 2017). Bu çalışmada, makro modelleme tekniği kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Lineer analizler için, Tablo 1 de verilen malzeme özellikleri oluşturulan sonlu eleman modelinin ilgili yerlerine atanmıştır. Lineer olmayan analizlerde ise, tarihi eserlerde literatürdeki çalışmalarda (Karaton, 2017) yer bulan Mohr- Coulomb malzeme modeli taş ve dolgu malzeme için kullanılmıştır. Bu modelde yenilme yüzeyi formülasyonu;

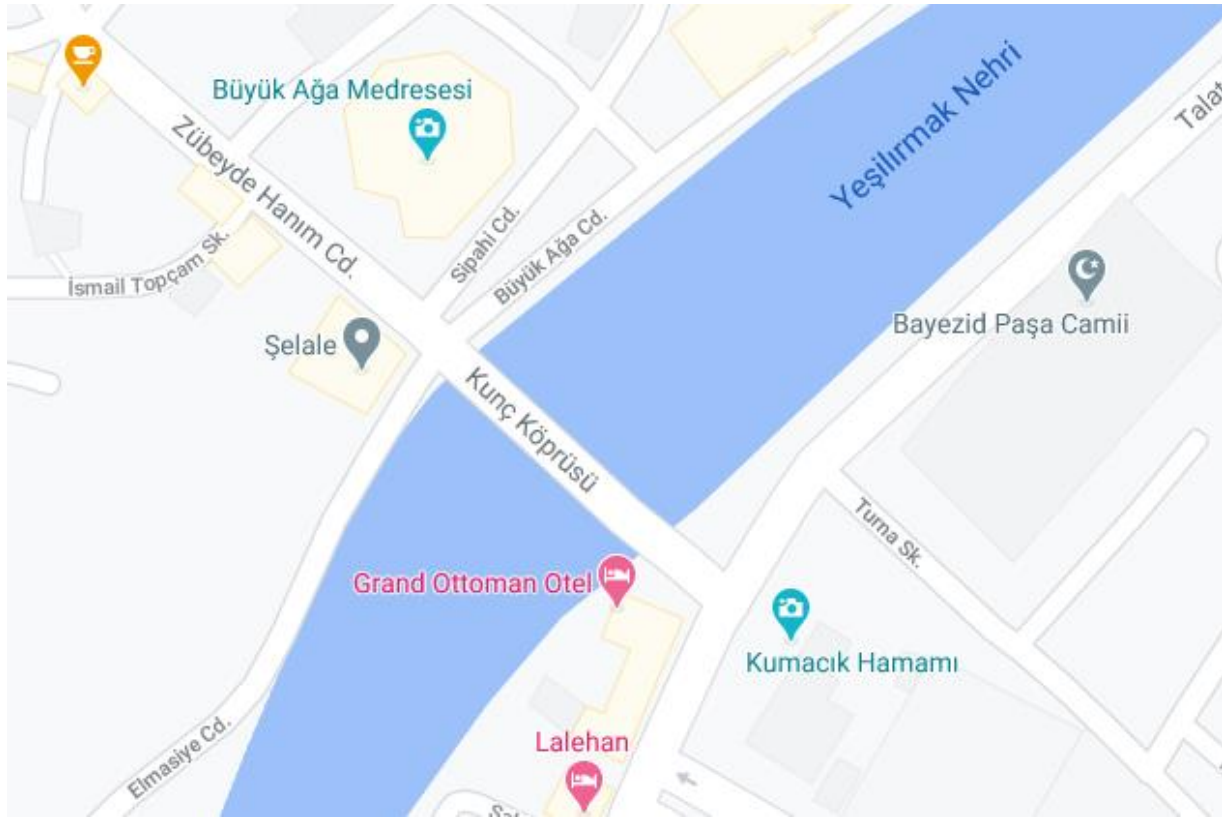
$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

olarak ifade edilmekte, c ve ϕ parametreleri bilindiğinde yenilme yüzeyi tanımlanmış olmaktadır (https://en.wikipedia.org/wiki/Mohr%E2%80%93Coulomb_theory). Bu çalışmada taş ve dolgu kısımları için ele alınan c ve ϕ parametreleri Tablo 2 de verilmektedir.

Tablo 2. Köprüde kullanılan homojenleştirilmiş malzemelerin Mohr- Coulomb Malzeme modeli özellikleri (Tiberti, 2018 ve Karaton, 2017)

Köprü bölümü	Cohesion (c) (MPa)	Sürtünme açısı (ϕ)
Kemerler ve yan duvarlar	0,15	30 ⁰
Dolgu	0,05	20 ⁰

Çalışmada ele alınan tarihi Hundi Hatun köprüsü, şehir içerisinde yoğun bir trafik yüküne maruz kalmaktadır. Yakınlarda hizmete giren tünelin yoğun trafiğinin de bu bölgeye verilmesi neticesinde, köprü'nün iki ucunda trafik sıkışması meydana gelmekte ve köprüden geçiş yapan araçlar köprü üzerinde beklemek zorunda kalmaktadırlar. Bu durumda, köprüye büyük miktarda araç yükünün etkimesi durumu ortaya çıkmaktadır. Şekil 4 de, bu durum görülmektedir.



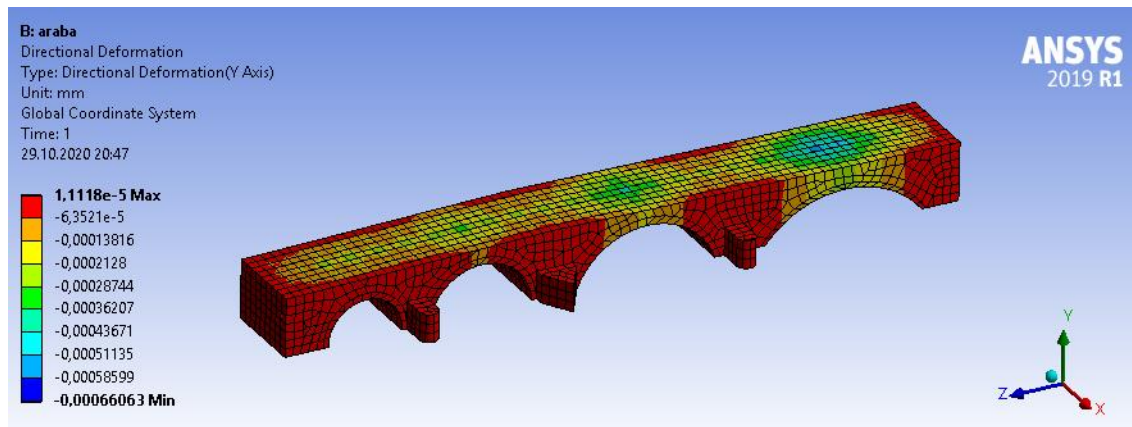
Şekil 4. Hundi Hatun Köprüsü Şhiriçi Konumu ve Üzerindeki Yoğun Trafik Yükü
(<https://www.google.com/maps/@40.6579007,35.8350253,17.79z?hl=tr>)

Bu çalışmada, köprüye gelen bu yüklerin etkisinde köprüde meydana gelen gerilme ve deformasyon değerlerinin tespit edilebilmesi için, köprüye etkileyecek farklı araç dingil ve toplam yükleri Tablo 3 de verilmektedir. Bu araç yükleri köprü üzerine 1 metre aralıklı olarak etkilmiştir. Yüklemelemlerde en olumsuz durumları ele alarak, köprüye en büyük yük değerleri yüklenmiştir. Bu durumun oluşabilmesi için, köprü'nün her iki şeridinin Tablo 3 de verilen ve detaylı dingil ağırlıkları verilen araçlarla yüklendiği durumlar gözönüne alınmıştır. Böylece, maksimum gerilme ve deformasyonların oluşması amaçlanmıştır. Bu araç yükleri köprü üzerine etkililirken, araçların dingil mesafeleri de dikkate alınmış ve dingil yükleri her bir tekere eşit dağıtılarak gerçek yükleme durumu köprü üzerinde oluşturulmuştur. Bu sayede, köprü üzerinde her iki köprü ucunda meydana gelebilecek trafik sıkışıklığından dolayı köprü üzerinde meydana gelebilecek en büyük yük değerleri gözönüne alınmıştır. Köprü her iki şeridinde farklı tip araçların birikmesi olasılığı bulunuyorsa da bu çalışmada maksimum yük değerleri dikkate alınarak en olumsuz durumun incelenmesi amaçlanmıştır.

Tablo 3. Araç cinsleri ve yükleri

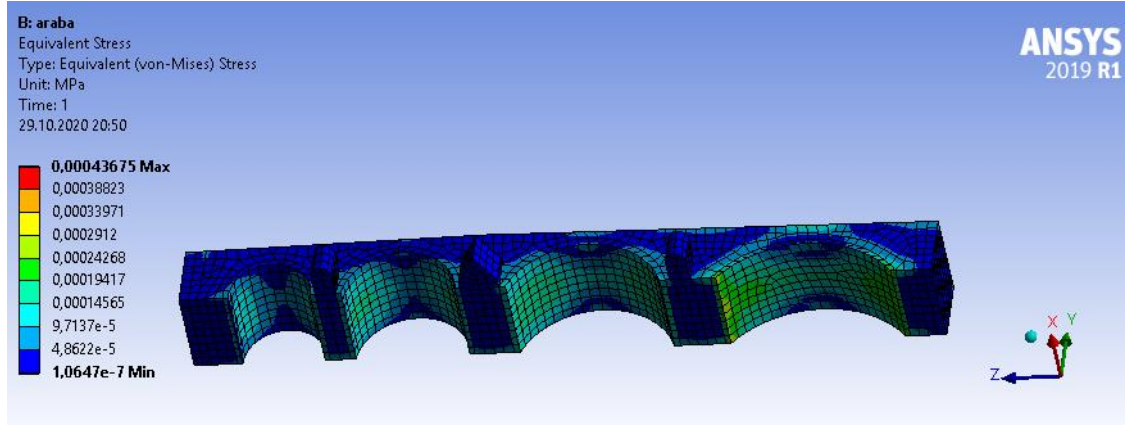
ARAÇ CİNSİ	ÖN DİNGİL YÜKÜ(Kg)	ARKA DİNGİL YÜKÜ(Kg)	TOPLAM AĞIRLIK (Kg)
Minibüs	1287	1423	2710
Kamyonet	2800	5100	7900
Binek araba	726	724	1450
Otobüs	4470	7520	11990

4.1 Otomobil Yükü Altında NonLinear Statik Analiz



Şekil 5. Otomobil yükü altında elde edilen deformasyon dağılımı

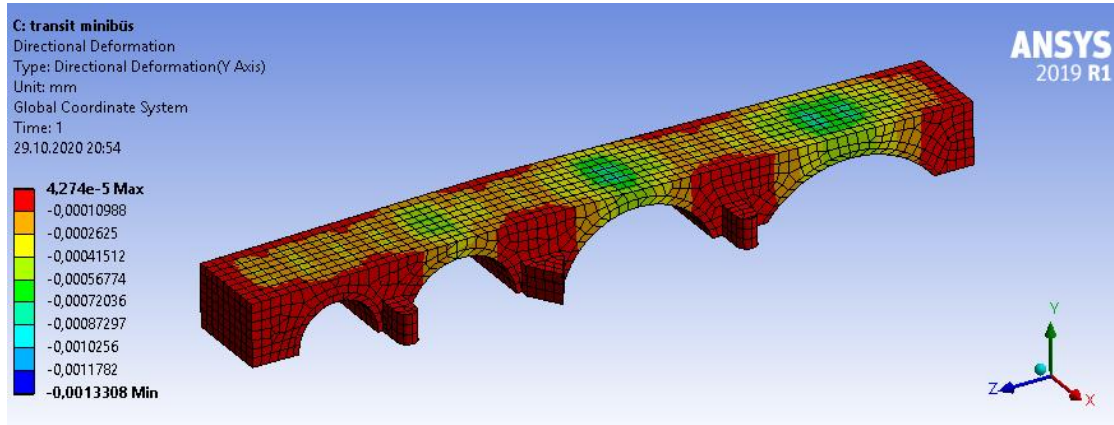
Otomobil yükü altında oluşan deformasyon dağılımı Şekil 5 de görülmektedir. Maksimum deformasyon değeri 0.00066 mm olarak basık kemer tepe noktasında okunmaktadır.



Şekil 6. Otomobil yükü altında elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı

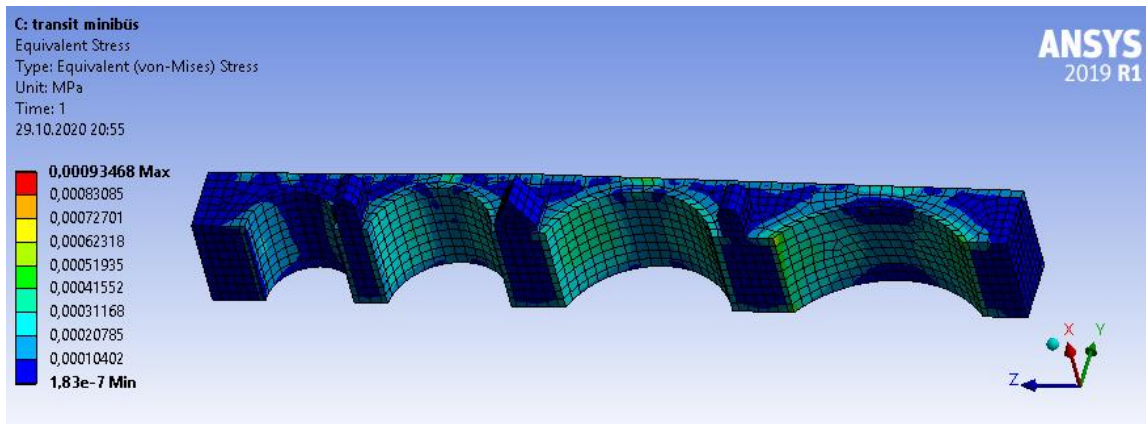
Otomobil yükü altında oluşan von Mises gerilme dağılımı Şekil 6 da görülmektedir. Maksimum gerilme değeri 0.000436 MPa olarak basık kemer mesnet noktalarında okunmaktadır.

4.2 Minibüs Yükü Altında NonLineer Statik Analiz



Şekil 7. Minibüs yükü altında elde edilen deformasyon dağılımı

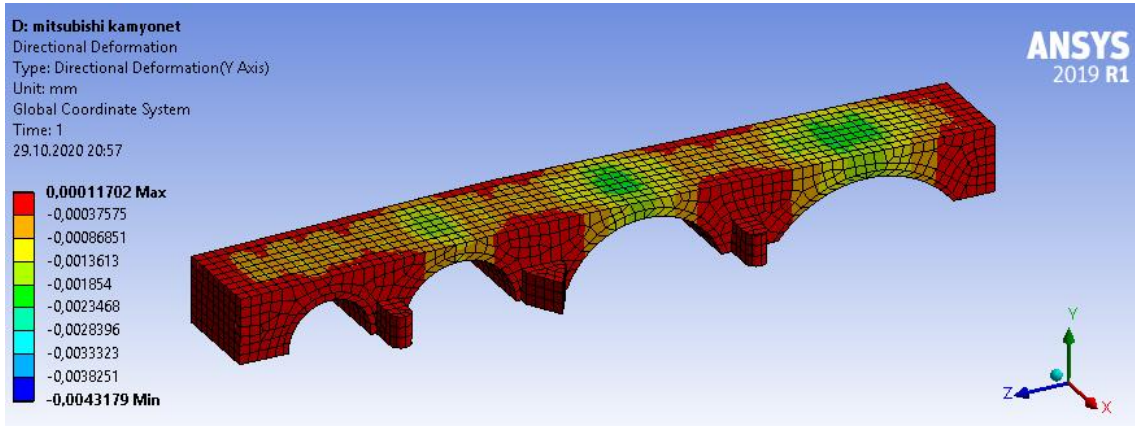
Minibüs yükü altında oluşan deformasyon dağılımı Şekil 7 de görülmektedir. Maksimum deformasyon değeri 0.00133 mm olarak basık kemer tepe noktasında okunmaktadır. Orta kemer ve diğer küçük kemer tepe noktalarında da deformasyonlar yüksek değerler almaktadırlar.



Şekil 8. Minibüs yükü altında elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı

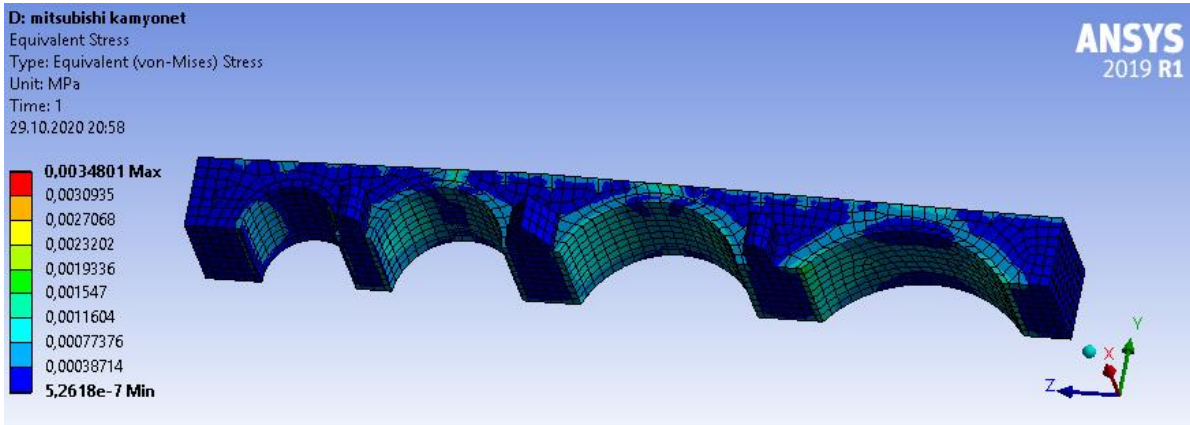
Minibüs yükü altında oluşan von Mises gerilme dağılımı Şekil 8 de görülmektedir. Maksimum gerilme değeri 0.000934 MPa olarak basık kemer mesnet noktalarında okunmaktadır. Orta kemer ve diğer küçük kemer tepe noktalarında, kemer üçtebir noktalarında gerilmeler yüksek değerler almaktadırlar.

4.3 Kamyonet Yükü Altında NonLineer Statik Analiz



Şekil 9. Kamyonet yükü altında elde edilen deformasyon dağılımı

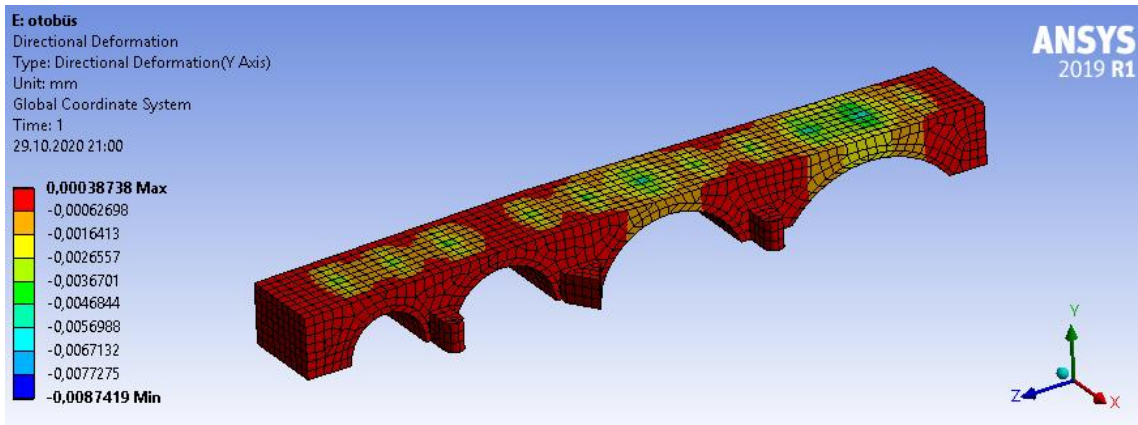
Kamyonet yükü altında oluşan deformasyon dağılımı Şekil 9 da görülmektedir. Maksimum deformasyon değeri 0.00431 mm olarak basık kemer tepe noktasında okunmaktadır. Orta kemer ve diğer küçük kemer tepe noktalarında da deformasyonlar yüksek değerler almaktadırlar.



Şekil 10. Kamyonet yükü altında elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı

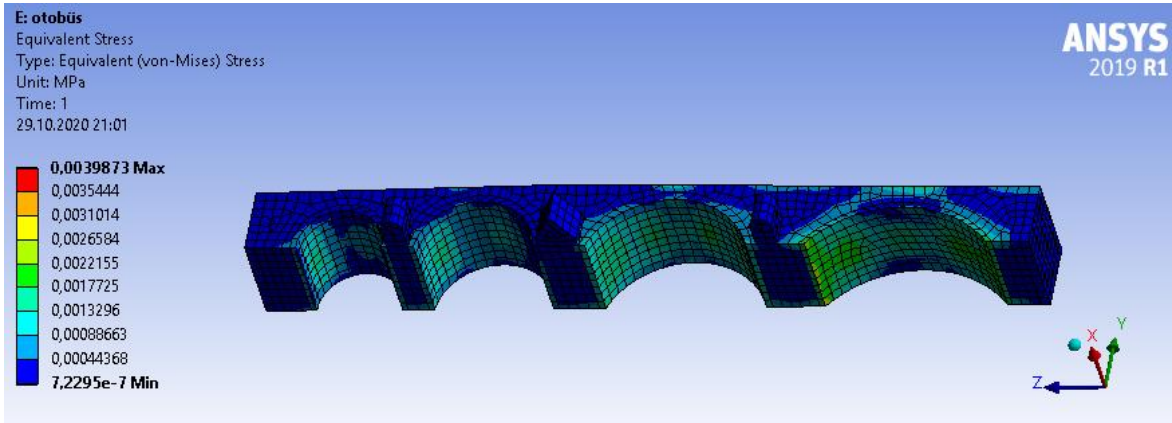
Kamyonet yükü altında oluşan von Mises gerilme dağılımı Şekil 10 da görülmektedir. Maksimum gerilme değeri 0.00348 MPa olarak basık kemer mesnet noktalarında okunmaktadır. Orta kemer ve diğer küçük kemer tepe noktalarında, kemer üçtebir noktalarında gerilmeler yüksek değerler almaktadırlar.

4.4 Otobüs Yükü Altında NonLineer Statik Analiz



Şekil 11. Otobüs yükü altında elde edilen deformasyon dağılımı

Otobüs yükü altında oluşan deformasyon dağılımı Şekil 11 de görülmektedir. Maksimum deformasyon değeri 0.00874 mm olarak basık kemer tepe noktasında okunmaktadır. Orta kemer ve diğer küçük kemer tepe noktalarında da deformasyonlar yüksek değerler almaktadırlar.



Şekil 12. Otobüs yükü altında elde edilen eşdeğer gerilme dağılımı

Kamyonet yükü altında oluşan von Mises gerilme dağılımı Şekil 12 de görülmektedir. Maksimum gerilme değeri 0.00398 MPa olarak basık kemer mesnet noktalarında okunmaktadır. Orta kemer ve diğer küçük kemerler tepe noktalarında, kemer üçtebir noktalarında gerilmeler yüksek değerler almaktadırlar.

5. Rijit Blok Analizi

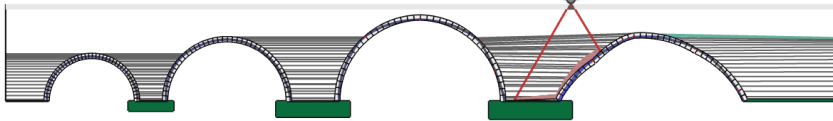
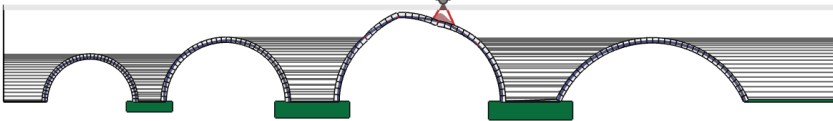
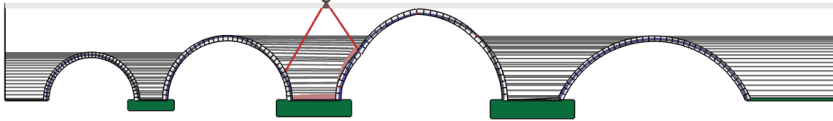
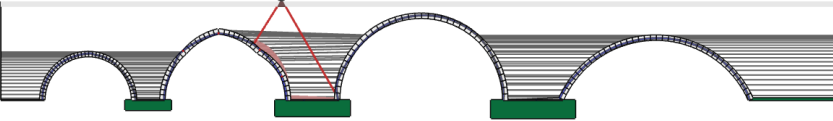
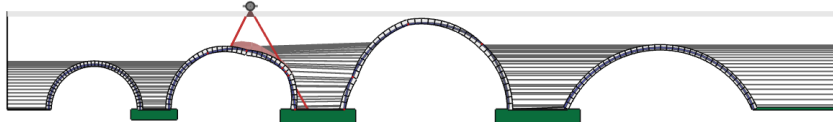
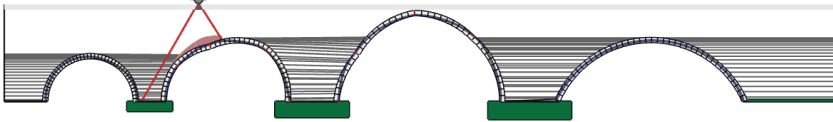
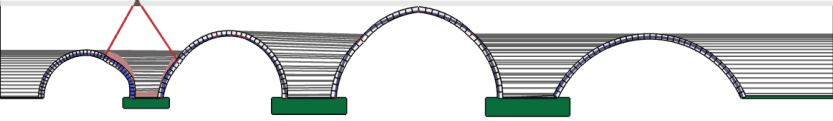
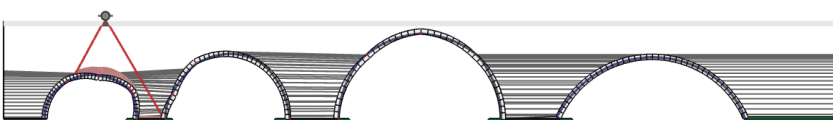
LimitState:RING yığma kemer köprülerin analizi için kullanılan bir yazılımdır. Yazılım, geniş bir alandaki potansiyel tepki modlarının tanımlanması için matematiksel optimizasyon işlemi ve rijit blok analizi metodunu kullanmaktadır. Program tek ve çok açıklıklı kemer köprülerin nihai taşıma güçlerini hesaplamaktadır. Program kemer yapıyı rijit blokların birleşimi olarak ele almaktadır. Yapı birleşim noktalarında sıfır kalınlık ve çekme gerilmesi dayanımlı olarak düşünülmemektedir. Köprü üzerine uygulanan dingil yükünün, kemer üst noktalarından alt noktalarına ve dolgu malzemesinin kemerlere olan etkisi de programda gözönüne alınmakta ve yapı gerçek duruma oldukça yakın bir şekilde analiz edilebilmektedir (<https://www.limitstate.com/>)

Bu yazılım kullanarak mevcut köprü üzerine sabit 1 kN luk dingil yükü etkilmiştir. Yazılım, bu sabit yükün farklı noktalara uygulanarak, köprü yıkılma mekanizmasını gösterebilmesine olanak sağlamaktadır. Yük uygulandıktan sonra, yeterlilik faktörü adı altında program tarafından verilen sayısal değer dingil yükü ile çarpılması ile, köprü yenilme yük değeri elde edilmektedir. Mevcut köprü için bu analiz gerçekleştirilmiş ve yıkılma mekanizmaları ile yeterlilik faktör değerleri Tablo 4 de verilmiştir.

Tablo 4. Köprü yenilme mekanizmaları ve yeterlilik faktörleri

YENİLME MEKANİZMASI	YETERLİLİK FAKTÖRÜ
	4020
	4060
	4530

Tablo 4 (devam). Köprü yenilme mekanizmaları ve yeterlilik faktörleri

YENİLME MEKANİZMASI	YETERLİLİK FAKTÖRÜ
	27300
	2570
	48200
	19400
	6510
	4660
	91700
	20800

6. Sonuçlar

Tarihi eserler bakımından oldukça zengin bir yapıya sahip olan Amasya kentinde bulunan Hundi Hatun (Kunç) köprüsü mevcut trafik yükleri altında lineer malzeme özelliği de dikkate alınarak incelenmiştir. Köprü üzerinde her iki şeritin dört farklı araç yükü ile tam olarak dolu olduğu durumlar gözönüne alınmıştır. Bu araçlar; otomobil, minibüs, kamyonet ve otobüstür. Adı geçen bu araç yükleri altında yapılan statik yüklemeler neticesinde şu sonuçlar elde edilmiştir:

- En küçük yük olan otomobil yükü altında, gerilme ve deformasyon değerleri en büyük basıklık oranına sahip olan kemerde ortaya çıkarken, yük değeri arttırıldığında gerilmeler diğer kemerlerde de yüksek değerler almaya başlamaktadır. Fakat en büyük deformasyon değeri, yine en büyük basıklık oranına sahip kemerde ortaya çıkmaktadır.
- Deformasyonlar bütün yükleme tiplerinde, köprü yol güzergahı boyunca ortaya çıkmaktadır. Bu durumda, zamanla köprü üst yol bölümünde bozulmaların ortaya çıkmasına sebep olacağı tespit edilmiştir.
- Yine tüm yükleme tipleri gözönüne alındığında, gerilmeler kemer alt noktalarından başlayarak üst kısımlara doğru gelişim göstermektedir. Köprüye etkiyen yük değeri yükseldikçe, gerilme değerleri daha büyük bir alana yayılım göstermektedir.

- Tüm yükleme tiplerinde gerilme değeri emniyetli gerilme değeri olan 0,81 MPa dan, deformasyon değerleri ise 10 mm'den (Kaya, 2018) küçüktür. Bu yükleme tipleri altında köprü, gerilme ve deformasyonlar açısından güvendedir.
- Statik yükleme durumlarında köprü güvende olmasına rağmen, uzun süreli tekrarlı yüklemelerde, oluşan çekme gerilmelerinin köprü de bozulmaya yol açabileceği tespit edilmektedir. Dolayısı ile, tüm yığma birimlerin birbirlerine çekme gerilmesini karşılayan demir kenetlerle bağlanmasının gerekliliği ortaya çıkmaktadır.
- Rijit blok analizi neticesinde ise, köprüde plastik mafsalların oluşmasını sağlayacak minimum dingil yükünün 257 ton gibi oldukça yüksek bir değer olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun, yükün yüksekliği en fazla olan orta kemer üçtebir noktasında iken oluştuğu tespit edilmektedir. Bu yük değeri sadece bu kemerde yenilme mekanizması oluşturmaktadır.
- Köprüyü yıkılma durumuna getirebilecek ikinci en küçük dingil yükü değeri 402 t olup, en büyük basıklığa sahip kemer üzerine uygulandığında ortaya çıkmaktadır. Fakat burada oluşan yenilme mekanizması bu kemerle sınırlı kalmamakta, bitişik diğer kemerde de plastik mafsallara yol açmaktadır. Bu durumda, kemer geometrisinin köprü taşıma gücünde oldukça önemli olduğunu göstermektedir.
- Yine rijit blok analizi neticesinde, dingil yüklerinin kemerler arası bölgelerde çok büyük değerler sahip olduğunda yenilme mekanizması oluşmasına rağmen, kemer tepe noktaları sağ ve sol kısımlarındaki kemer geometrisi üçte bir bölgesine uygulandıklarında, çok daha küçük değerlerle plastik mafsallara yol açmaktadır. Bu durumda, kemer geometrisinin köprü taşıma gücünde oldukça önemli olduğunu göstermektedir.
- Yenilmeye neden olacak dingil yükünün çok yüksek (257 ton) olmasından dolayı, halihazırda köprünün mevcut trafik yükünü statik durumda emniyetle taşıyabileceği görülmektedir.

Çalışmanın, ileride köprü üzerinde yapılabilecek restorasyon ve renovasyon faaliyetlerine yol gösterici olması hedeflenmektedir.

Referanslar

Altaş, G.K., Özgünler, S.A. ve Güldal, E. (2012). İstanbul'daki Roma Dönemi Saray Yapılarındaki Horasan Harçlarının İncelenmesi. Vakıf Restorasyon Yıllığı. Sayı:4. 42-49.

ANSYS (2019). Finite Element Software. USA.

Ataei, S., Miri, A., & Jahangiri, M. (2017). Assessment of load carrying capacity enhancement of an open spandrel masonry arch bridge by dynamic load testing. International Journal of Architectural Heritage, 11(8), 1086–1100. <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1317882>

Augusthus-Nelson, L., & Swift, G. (2020). Experimental investigation of the residual behaviour of damaged masonry arch structures. Structures, 27(March), 2500–2512. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.008>

Conde, B., Díaz-Vilariño, L., Lagüela, S., & Arias, P. (2016). Structural analysis of Monforte de Lemos masonry arch bridge considering the influence of the geometry of the arches and fill material on the collapse load estimation. Construction and Building Materials, 120, 630–642. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.107>

Çakır, F., Şeker, B. Ş. (2015). Structural performance of renovated masonry low bridge in Amasya, Turkey. Earthquakes and Structures, Vol 8, No:6, 1387-1406.

Çulpan, C. (2002). Türk Taş Köprüleri, Ortaçağdan Osmanlı Devri Sonuna Kadar. Türk Tarih Kurumu Basımevi. Ankara.

Hokelekli, E., & Yılmaz, B. N. (2019). Effect of cohesive contact of backfill with arch and spandrel walls of a historical masonry arch bridge on seismic response. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 63(3), 926–937. <https://doi.org/10.3311/PPci.14198>

http://cografyaharita.com/haritalarim/41_amasya_ili_haritasi.png

https://en.wikipedia.org/wiki/Mohr%E2%80%93Coulomb_theory

<https://www.google.com/maps/@40.6579007,35.8350253,17.79z?hl=tr>

<https://www.limitstate.com/>

Kamiński, T. (2018). The ultimate limit state vs. Limit analysis of masonry arch bridges. Maintenance, Safety, Risk, Management and Life-Cycle Performance of Bridges - Proceedings of the 9th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2018, (July 2018), 2687–2694.

Karaton, M., Aksoy, H. S., Sayın, E., & Calayır, Y. (2017). Nonlinear seismic performance of a 12th century historical masonry

bridge under different earthquake levels. *Engineering Failure Analysis*, 79(December 2016), 408–421. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.05.017>

Karaton, M., Aksoy, H.S. and Sayın E. (2017). Nonlinear seismic performance of a 12th century historical masonry bridge under different earthquake levels. *Engineering Failure Analysis*. 79. 408-421.

Kaya, M. (2018). Aksaray Debbağlar Köprüsü: Günümüz Trafik Yükleri Altında Dinamik Analizi. Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. Isparta.

Kindij, A., Mandic Ivankovic, A., & Vasilj, M. (2013). Assessment of Masonry Arch Bridge With Concrete Deck. 7th International Conference on Arch Bridges (ARCH'13), (May), 723–730.

Kolla, Abhinav, Ravi Naga Sai Kurapati, Sree Satya Venkat Meka, Venkata Sai Madhu Dinesh Vitakula, and Venkata Dilip Kumar Pasupuleti. (2021). *Health Assessment and Modal Analysis of Historical Masonry Arch Bridge*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64594-6_88.

Meriç C., Ç., & Bağbancı, M. B. (2019). The Investigation of Construction Techniques and Material Usage of Historical Stone Bridges in Anatolia and Balkans. In *International Refereed Journal of Design and Architecture* (Vol. 17). <https://doi.org/10.17365/tmd.2019.2.4>

Nobile, Lucio, and Veronica Bartolomeo. (2015). Structural Analysis of Historical Masonry Arches: State-of-the-Art and Recent Developments. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences* 9: 338–44.

Onat O, & Yön B. (2018). Adopted Material Properties of Historical Masonry Structures for Finite Element Models: Mosques and Bridges. *Turkish Journal of Science & Technology* Volume 13(1), 69-75.

Özmen, A., and Sayın E. (2018). Seismic Assessment of a Historical Masonry Arch Bridge. *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics* 1 (2): 95–104. <https://doi.org/10.31462/jseam.2018.01095104>.

Paeglitis, A., Paeglitis, A., Vitiņa, I., & Igaune, S. (2013). Istorinio mūrinio arkinio tilto tyrimas ir atnaujinimas. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 8(1), 32–39. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2013.05>

Pelà, L., Aprile, A., & Benedetti, A. (2009). Seismic assessment of masonry arch bridges. *Engineering Structures*, 31(8), 1777–1788. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.012>

Pepi, C., Gioffrè, M., Comanducci, G., Cavalagli, N., Bonaca, A., & Ubertini, F. (2017). Dynamic characterization of a severely damaged historic masonry bridge. *Procedia Engineering*, 199(December), 3398–3403. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.579>

Pouraminian, M., Pournakhshian, S., Noroozinejad Farsangi, E., Berenji, S., Borujeni, S. K., Moosavi Asl, M., & Mohammad Hosseini, M. (2020). Reliability-Based Safety Evaluation of the BISTOON Historic Masonry Arch Bridge. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 30(1), 87–110. <https://doi.org/10.2478/ceer-2020-0008>

Rahman, M. E., & Fanning, P. J. (2010). An examination of backing effects on ratings for masonry arch bridges. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 72(September), 314–316. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1063128>

Rodrigo, B. G., Olària, S. R. i, Fernández-Ordoñez, D., & Gómez, J. M. C. S. (2015). Rehabilitation of historic masonry bridges: Lessons learned from a medieval bridge in northeast Spain. *Revista de La Construcción*, 14(2), 9–13. <https://doi.org/10.4067/s0718-915x2015000200001>

Rodrigues, N., Ramos, A., & Branco, F. (2008). Rehabilitation of Historical Masonry Bridges. 1st International Conference Construction Heritage in Coastal and Marine Environments -- Damage, Diagnostic, Maintenance and Rehabilitation, (January 2008), 1–10. <https://doi.org/10.13140/2.1.3993.6007>

Tiberti, S. and Milani, G. (2018). Historic City Centers After Destructive Seismic Events, The Case of Finale Emilia During the 2012 Emilia-Romagna Earthquake: Advanced Numerical Modelling on Four Case Studies. *Open Civ. Eng. Journal*. Vol. 11, No. 1. pp. 1059–1078.

Tubaldi, E., Minga, E., Macorini, L., & Izzuddin, B. A. (2020). Mesoscale analysis of multi-span masonry arch bridges. *Engineering Structures*, 225(November 2019), 111137. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111137>

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. (2019). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.



İri Agrega Olarak İnşaat Yıkıntı Atığı, İnce Agrega Olarak Doğal ve Kırma Kum Kullanılan Betonun Bazı Mühendislik Özelliklerinin İncelenmesi

Investigation of Some Engineering Properties of Concrete Using Construction Wreckage Waste as Coarse Aggregate, Natural and Crushed Sand as Fine Aggregate

Mustafa Kürşad Korkut¹ , Osman Şimşek¹ 

¹ Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi 06500 Teknikokullar / Ankara, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 12/02/2021

Kabul / Accepted: 25/03/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 23/05/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Günümüz inşaat sektöründe en önemli yapı malzemesinden biri betondur. Beton malzemesinin önemli sorunları vardır. Bu sorunların başında kaliteli agrega temini, ikincisi ise inşaat yıkıntı atıklarının çevre kirliliği ve sürdürülebilirliğidir.

İri agrega olarak inşaat yakıntı atığından (İYA) elde edilen ve ince agrega olarak kırma kum (KK) ve doğal kum (DK) kullanımlarıyla farklı oranlarda yüksek performanslı süper akışkanlaştırıcı kullanılarak beton üretilmiştir. Beton karışımında agrega olarak yıkıntı atığı agregası (YAA) (4-11,2) %24, (11,2-22,4) %29 ve ince agrega DK ve KK (0-4) %47 oranlarında kullanılmıştır. Bağlayıcı olarak CEM I 42,5 R çimentosu ve yüksek performanslı süper akışkanlaştırıcı miktarı ise çimento ağırlığının %0, %1, %1,5 ve %2 oranlarında kullanılarak beton üretilmiştir. Üretilen betonların işlenebilirlik, basınç ve yarmada çekme dayanımları, aşınma, kılcal su emme oranları ve boy değişimleri gözlenmiştir.

YAA yanında kullanılan DK ile üretilen betonun işlenebilirliği yüksek iken diğer mekanik ve fiziksel özelliklerinin çalışmanın en düşük özelliklerini gösterdiği görülmüştür. KK ile üretilen beton karışımında işlenebilirliğin azalmasına karşın mekanik ve fiziksel özellikleri çalışmanın en yüksek performansa sahip değerler sergilediği saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Yıkıntı atığı agregası, basınç dayanımı, kapiler su emme, serbest rötre”

Abstract

Concrete is one of the most important building materials in today's construction industry. Concrete material has important problems. The first of these problems is to supply quality aggregate and the second is the environmental pollution and sustainability of construction wreck wastes. Concrete was produced by using high performance super plasticizer in different proportions, using crushed sand (KK) and natural sand (DK) as fine aggregate and coarse aggregate obtained from construction wreck waste (İYA). YAA (4-11.2) 24%, (11.2-22.4) 29% and fine aggregate DK and KK (0-4) 47% were used as aggregates in the concrete mixture. Concrete was produced by using CEM I 42.5 R cement as the binder and the amount of high-performance super plasticizer at 0%, 1%, 1.5% and 2% of the cement weight. Workability, compression and splitting tensile strength, abrasion, capillary water absorption rates and length changes of the concrete produced were observed. It has been observed that the workability of concrete produced with DK used in addition to YAA is high, while other mechanical and physical properties show the lowest properties of the study. Although the workability of the concrete mixture produced with KK has decreased, it has been determined that the mechanical and physical properties of the work have the highest performance values.

Key Words

“Construction wreck waste, compressive strength, capillary water absorption, free shrinkage”

1. Giriş

Günümüz dünyasının en önemli sorunlarından birisi olan kaliteli hammaddeye ulaşmada sınırlılık olmakla beraber ikincisi ise inşaat yıkıntı atıklarının çevre kirliliğidir. Dünya genelinde sürdürülebilir inşaat faaliyetleri için gerekli hammaddelerin karşılanması yanında, inşaat yıkıntı atıklarının kullanımının yaygınlaştırılmasına yönelik çalışmaların teşvik edildiği bilinmektedir. İnşaat yıkıntı atığı sorunlarına yönelik çözümlerden birisi bu atıkların tekrar kullanımı ile çevre kirliliğinin azaltılmasının yanında sürdürülebilirlik olarak değerlendirilmesidir. Özellikle birçok ülkede, inşaat yıkıntı atıklarının (İYA) geri dönüştürülerek tekrar kullanımının araştırılmasına öncelik kazandırılmıştır. (Esra & Şenol, 2008).

Yükselen görkemli binalar, inşa edilen asfalt yollar ve restore edilen yerleşkeler dikkate değer bir atık yoğunluğunun oluşmasına neden olmuştur. Avrupa Komisyonu'nun 1999 yılında hazırladığı raporda, 15 üye ülkede 350 milyon nüfusla her yıl yaklaşık 180 milyon ton İYA üretildiği görülmektedir. Ortalama olarak bu atığın %28' i geri dönüştürülmekte ve %78' i depolanmaktadır. Almanya, Birleşik Krallık, Fransa, İtalya ve İspanya tarafından üretilen İYA' lar, AB üye devletlerinin ürettiği atığın yaklaşık %80' ini oluşturmaktadır. Hollanda, Belçika ve Danimarka, İYA' ların geri dönüştürülmesinde büyük başarı elde eden ülkelerdir (Esra & Şenol, 2008; Maçin & Demir, 2018). Lauritzen (1994) Belçika'da %40'ı beton, %40'ı tuğla, %12'si bitümlü briket, %3,4'ü seramik olmak üzere yaklaşık 4,6 milyon ton inşaat ve yıkım atığı olduğunu vurgulamaktadır.

Türkiye'de son 10 yılda gerçekleşen en fazla can ve mal kaybına sebebiyet veren depremlerden birisi 2011 yılında olan Van depremidir. Bu deprem sonrasında ülkemizdeki yapılaşmanın, standartların altında kaldığı acı bir tabloyla gün yüzüne çıkmıştır. Depremi takip eden yılda, 31.03.2012 tarih 6306 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun ile şehirlerimizde ve ilçelerimizde Çevre ve Şehircilik Bakanlığımızca yürütülen kapsamlı çalışmalar sonucunda riskli yapılar ve alanlar ilan edilip, restorasyonlara ve yeni yapılaşmalara başlanmıştır (Ölmez & Yıldız, 2008; Maçin & Demir, 2018; Resmi gazete, 2012).

Devlet Planlama Teşkilatı VIII. 5 Yıllık Kalkınma Planı (2001 -2005) raporunda belirtildiği üzere; İnşaat-yıkım ve hafriyat atıkları: 17 Ağustos ve 12 Kasım 1999 tarihlerinde meydana gelen depremlerde yapılan hasar tespiti sonucunda yaklaşık 43.000 binanın yıkıldığı ve çok büyük miktarda inşaat atığının meydana geldiği tespit edilmiştir. Yaklaşık 13 milyon ton moloz olduğu tahmin edilmektedir. Bu atıklar Çevre Bakanlığı ve Çevre İl Müdürlüklerinin belirlediği yerlerde depolanmış, bir kısmı ise depremin ilk günlerinde denize dökülmüştür. Söz konusu raporun "Karşılaşılan sorunlar ve çözüm önerileri" bölümünde inşaat yıkıntı atıklarıyla ilgili önerilerden ilki doğal afetlerle ilgili yasal düzenlemeler olup, afet, yıkıntı ve atıkların yönetiminin de dikkate alınarak yeniden düzenlenmesine yönelik. İkincisi de bölgesel moloz yönetimine dair bir plan hazırlanmasına yöneliktir ve bu program doğrultusunda molozlardan demir, çimento ve çakıl geri kazanımına yönelik yapılacak çalışmaların önemi vurgulanmaktadır. Bu raporun çözüm önerisi olarak "molozlardan demir, çimento ve çakıl geri kazanılmalı" yer almaktadır (DPT, 2000). Mevcut yapı stokunun 2000 yılından öncekinin çoğunluğu depreme dayanıksız olduğu yaşanan depremler neticesinde anlaşılmaktadır. Bu nedenle hızlı şehirleşme nedeniyle yapı stokunun yenilenmesi, kentsel dönüşümün önemi artmıştır.

Devlet Planlama Teşkilatı IX. 5 Yıllık Kalkınma Planı (2007 -2013) raporunda belirtildiği üzere; doğal kum çakıl oranı belirli oranda azalma gösterirken, kırma agrega (kırma taş agrega) üretim oranı yani kullanım oranının oldukça arttığı raporlandırılmıştır (DPT, 2007). Raporda belirtildiği gibi kaliteli, taş ocaklarına bağlı kırma agrega kullanımının artması hem maliyeti artırmakta hem de doğal topoğrafik yapıyı bozarak çevre kirliliğine neden olmaktadır. Betondan belirli bir kalite standardı istenmesi, beton teknolojisindeki ilerlemeye paralel olarak, betonun iskeletini oluşturan agrega kalitesini de ön plana çıkarmaktadır. DPT raporunda bahsedildiği gibi kaliteli agrega sıkıntısı çekilen yerlerde veya çevre kirliliğinin azaltılması amacıyla yüksek dayanım istenmeyen (kaldırım, su geçirgen beton, saha betonu, şehir içi açık otopark vb.) yerlerde, atık betonların kırılmasıyla elde edilen geri dönüşüm agregası (GDA) kullanarak üretilen betonlar kullanılabilir. Genel olarak GDA iki şekilde elde edilmektedir. Bunlardan birincisi atık betonların kırılarak agregaya dönüştürülmesiyle elde edilen geri dönüşüm agregası, ikincisi ise inşaat yıkıntı atığı (moloz) olan kâgir malzemelerden elde edilen inşaat yıkıntı atığı agregasıdır (İYAA). Bu konularda son yıllarda çalışmalar yaygınlaşmıştır.

GDA tanelerinin çimento hamurundan oluşması, doğal agrega yüzeyiyle etkileşime girmesi sonucu ortaya çıkan betonun agrega tane boyutuna getirilmesi ile oluşur. Bu çimento hamurunun miktarı, su emilimi, yoğunluk, aşınma direnci ve çimento hamuru ile agreganın yapışması gibi olguların GDA performansını etkilediği görülmüştür. GDA' nın içi boş yapısı ve yüzeyinde bulunan eski harç tabakası nedeniyle doğal agregaya göre daha düşük yoğunluk ve daha yüksek su emme oranına sahiptir. Çalışmada doğal agreganın su emme oranı %0,5 ile %1 arasında değişirken, GDA' nın su emme oranı %4 ile %12 arasında değiştiği belirtilmiştir (Çelik, 2001; Kou, Poon & Chan, 2007)

Yapılan araştırmalarda atık betonun kalitesi GDA' nın kalitesi ile direkt bağlantılı olduğu vurgulanmıştır. Genel olarak GDA' nın teknik özelliklerinden su emme oranı ve aşınma kaybının beklentilerin üzerinde olduğu, ancak yoğunluklarının beklenilenden daha az olduğu araştırma sonucu tespit edildiği belirtilmiştir. GDA ile üretilecek betonun basınç dayanımı, agreganın elde edildiği betonun bir alt beton sınıfını karşılayabileceği açıklanmıştır. Bununla birlikte GDA ile üretilen betonların elastisite modülü ve basınç dayanım değerlerinin geri dönüştürülmemiş betonun çimento miktarına, dolayısıyla su/çimento (S/Ç) oranına, agrega kalitesine, dolayısıyla betonda oluşan boşluklarına ve çimento harcı ile oluşan agrega hamur aderanslarına bağlı olduğu vurgulanan önemli hususlar olarak tespit edilmiştir (Demirel, Toklu & Şimşek, 2015; Sonawane & Pimlikar, 2013)

Demirel & Şimşek (2014) yaptıkları çalışmada, C25 sınıfı olan atık betonlardan elde edilen iri ve ince agregaların betonda kullanım olanaklarını araştırmışlardır. Bu atık beton agregasını iri ve ince olarak iki gruba ayırmışlardır. Araştırmada çimento yerine %20 oranında uçucu kül (UK) ikame edilmiştir. Karışımda işlenebilirliği sağlamak için çimento kütlelerinin %1,2' si oranında süper akışkanlaştırıcı (SA) ilavesi yapılmıştır. Yapılan deneylerin sonuçlarına göre geri dönüşüm agregalarının beton üretiminde kullanılabilirliği tespit edilmiştir.

Durmuş vd. (2009), atık betondan elde edilen geri dönüşüm agregası ile üretilen beton üzerinde birim hacim ağırlık, ultra ses ve basınç deneyleri yapmışlardır. Geri dönüşüm agregalarının tamamı beton içerisinde kullanılmak istendiğinde beton tasarımında bir üst beton sınıfı kriterlerine göre hesaplanması vurgulanmıştır.

Süme (2016) yaptığı çalışmada inşaat yıkıntı atıklarının (İYA) geri dönüşümünün sağlanarak beton yol kaplamasında kullanılabilirliği üzerinde durmuştur. %100 temizlenmiş geri dönüşüm agregası (TGDA), %100 normal agregası (NA) ve geri dönüşüm agregasının (GDA) beton karışımına ağırlıkça %20, 40, 60, 80 oranında ikame edilerek üretilen betonun mekanik özellikleri araştırılmış. Bu mekanik özelliklerden eğilmede çekme ve basınç dayanımları belirlenmiş ve bulunan değerler karşılaştırılmıştır. GDA kullanım oranı arttıkça beton basınç dayanımının arttığı, eğilmede çekme dayanımının ise inişli çıkışlı bir grafik gösterdiği, %100 TGDA ile üretilen betonun eğilmede çekme ve basınç dayanımı diğer üretilen deney grupları arasında maksimum sonucu verdiği belirtilmiştir.

Son yıllarda meydana gelen doğal (deprem) felaket sonuçlarında meydana gelen molozlar için vahşi depolama yöntemi kullanıldığı bilinmektedir. Doğal felaketler dışında, inşaat yıkıntı atıkları, bazı ülkelerde sürdürülebilirlik açısından veya bazıları da kaliteli doğal kaynak sıkıntısından dolayı, bu yıkıntı atıklarını kırma eleme işleminden sonra geri dönüşüm malzemesi olarak farklı yerlerde, farklı amaçlar doğrultusunda kullanılmaktadırlar. İnşaat yıkıntı atıklarında kâgir kökenli (beton, kiremit sıva, boya ve duvar) malzemeleri agrega olarak beton üretiminde kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı; İri yıkıntı atığı agregasının beton üretiminde, elde edilecek olan betonun taze ve sertleşmiş özelliklerine etkisini incelemektir. Bu amaçla; inşaat yıkıntı atığı molozları taşıyıcı olmayan beton üretiminde kullanılmak üzere molozlardan kırılarak elde edilen yıkıntı atığı agregası (YAA) (4 -22) çakıl ile doğal kum (DK) (0-4) ve kırma kum (KK) agrega karışımıyla C 20 sınıfı beton tasarımı yapılarak bazı teknik özellikleri incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Yapılan bu çalışmada, YAA elde edilerek, iri agregası (4 – 22mm) olarak kullanılmış olup, ince agregası (0-4mm) olarak DK ve KK olmak üzere üç tip agregası kullanılmıştır. Bağlayıcı olarak CEM I 42,5 R kullanılırken işlenebilirlik için hiperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi, şehir şebekesi suyu ile karışımlar hazırlanmıştır.

2.1.1. Bağlayıcı ve karışım suyu

Çimentoya ait yoğunluk değeri 3,10 kg/dm³ dür ve CEM I 42,5 R çimentosunun kimyasal özellikleri **Tablo 1**'de verilmiş olup beton karışımında Ankara ilinin şebeke suyu kullanılmıştır.

Tablo 1. CEM I 42,5 R Çimentosuna ait teknik özellikleri

Oksitler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	K.Kaybı
(%)	20,7	6,0	2,4	63,6	2,6	2,1	0,1	0,9	1,4

2.1.2. Kimyasal katkı maddesi

Yapılan çalışmalarda kimyasal katkı malzemesi olarak modifiye polikarboksilat esaslı yüksek performanslı süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Söz konusu akışkanlaştırıcı tipi ve oranları karışımda kullanılan agregadan dolayı seçilerek üretici firmanın önerdiği çimentonun ağırlığının %0,4 - %2 oranlarında üst limitine yakın oranlarla kullanılması tercih edilmiştir. Bu tercihte, taze beton kıvamının agrega ve beton sınıfına bağlı olarak, karışım çökmesinin 3-8 cm arasında olması hedeflenmiştir. Katkı maddesinin teknik özellikleri **Tablo 2**'de verilmiştir.

Tablo 2. Kimyasal katkı malzemesinin teknik özellikleri (Sika)

Tip	Modifiye polikarboksilat esaslı polimer
Görünüm	Açık kahve renkli sıvı
Yoğunluk (kg/dm ³)	1,10 ± 0,02
pH	3 – 7
Suda Çözünabilir Klorür Yüzdesi Maksimum	0,1%, klorür içermez (TS EN 934-2)
Dozaj aralığı (%)	0,4-2

2.1.3. Araştırmada kullanılan agreganın teknik özellikleri

YAA, DK ve KK üzerinde yapılan elek analizi sonuçları **Tablo 3'de** verilmiştir. Agreganın, yoğunluk, su emme oranı, aşınma dayanımı, çok ince tane miktarı (metilen mavisi) ve yassılık endeksi deney sonuçları **Tablo 4'de** verilmiştir. **Tablo 4'de** görüldüğü gibi doğal kumun yoğunluğu kırma kumun yoğunluğundan daha düşüktür. Bu agregada grubu, bünyesinde farklı özelliklerde taneleri bulundurması sonucu yoğunluk değerinin düştüğü düşünülmekte, bu literatüre uygunluk göstermektedir (Şimşek, 2020). Doğal kumun su emme yüzdesi, kırma kumdan düşüktür, bu olgu aslında genel olarak yoğunlukla paralellik göstermektedir ve bu durum, aynı özelliklerdeki agregalar için de geçerlidir. Genel olarak, kırma kumun yüzey alanının doğal kumunkine göre fazla olmasından ve aynı zamanda kırılma özelliğinden dolayı doğal agregalara göre daha yüksek su emme değerine sahiptir. Aynı cins agregaların yoğunlukları ile su emme yüzdeleri arasında ters ilişki olduğu bilinmektedir. Kırma agreganın kirlilik oranı (ince tane miktarı) doğal kumdan daha fazla olmasına karşın standart limitin altındadır. Yıkıntı atığı agreganın aşınma direnci ve yassılık indeksi ilgili standartlarda verilen sınırların içindedir.

Tablo 3. Agreganın elek analizi

Elek (mm)	Çapı	Doğal Kum 0-4 (%47)	Kırma Kum	YAA (İnce Çakıl) 4-11,2(%24)	YAA(İri Çakıl) 11,2-22,4(%29)	İdeal Granülometri 0-22,4
22,4	100	100	100	100	100	100
16	100	100	100	100	85	86
11,2	100	100	100	98	5	71
8	100	100	100	72	0	62
4	100	100	100	5	0	47
2	75	70	70	0	0	35
1	45	55	55	0	0	24
0,5	10	25	25	0	0	16
0,25	2	10	10	0	0	6

Tablo 4. Agregaların fiziksel özellikleri

Agrega grupları	0-4 mm		4-11,2 mm		11,2-22,4 mm	
	DK	KK	YAA	YAA	YAA	YAA
Yoğunlukları (kg/dm ³)	2,41	2,68	2,40	2,40	2,36	2,36
Su emme (%)	1,9	2,80	4,52	4,52	4,72	4,72
Aşınma direnci kaybı(%)	-	-	9	9	13	13
Metilen mavisi (%)	2	3	-	-	-	-
Yassılık endeksi (%)	-	-	5,2	5,2	7,7	7,7

2.2 Metod

Araştırmada kullanılan agregaların tane büyüklüğü dağılımı TS EN 933-1(2015)' e göre (0–4mm), (4-11,2mm) ve (11,2–22,4mm) agregada gruplarının elek analizleri yapılmıştır. Agregaların tane yoğunluğu ve su emme özelliklerinin belirlenmesinde TS EN 1097-6(2015), yassılık endeksinin belirlenmesinde TS EN 933-3 (2015), parçalanma direncinin belirlenmesinde TS EN 1097-2 (2015) standartları esas alınmıştır. Ayrıca, ince tanelerin tayini – metilen mavisi deneyi ise TS EN 933-9+A1:2013 (2014) standardı baz alınarak yapılmıştır.

Beton tasarımında, beton sınıfı C20 planlanmış ve karışım hesabı TS 802(2016) esas alınarak yapılmıştır. Karışımında üç farklı agregada grubu kullanılmıştır. Bu agregada grupları, ideal granülometriye göre ince agregada (0–4mm) oranı %47, yıkıntı atığı agregada 1. grubu (4–11,2mm) oranı %24 ve yıkıntı atığı agregada 2. grubu (11,2–22,4mm) oranı ise %29 olarak hesaplanmıştır.

Taze betonların çökme (slump) özelliği için TS EN 12350-2 (2019) esas alınmıştır.

Sertleşmiş beton özelliklerinden, basınç dayanım testleri 7 ve 28 günlük numuneler, diğer özelliklerin tayini için ise 28 günlük numuneler kullanılmıştır. Betonun basınç dayanımı TS EN 12390-3 (2019) standardı esas alınarak yapılmıştır. Kapiler su emme değerlerini belirlemek için 100x100x100 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde TS EN 772-11(2012) standardı uygulanmıştır. Aşınma direncinin tayini için ASTM C944/944M-19 (2019) standardı kullanılmıştır. Serbest rötre özelliği 100x100x300mm beton prizma numuneler üzerinde TS ISO 1920(2011) standardı esas alınarak yapılmıştır. Yarmada çekme dayanım testleri TS EN 12390-6(2010) standardına göre yapılmıştır.

2.2.1. Beton karışımı tasarımı

Çalışmada beton tasarımı C 20 sınıfı olarak hedeflenmiştir. Beton karışım hesabı standardı TS 802, (2016) kullanılarak S/Ç oranı 0,60 ve su miktarı 203 lt olarak seçilmiştir. Hesaplamalar doğrultusunda çimento miktarının 338 kg/m³ olduğu tespit edilmiştir. İşlenebilirliği sağlamak amacıyla çimento ağırlığının %0, %1, %1,5 ve %2 oranında yüksek performanslı süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi eklenmiştir.

Üretilen karışımların basınç dayanımları TS EN 12390-3 (2019) ve rötre özellikleri TS ISO 1920-8.(2009) esas alınarak yapılmıştır. Taze betonda slump (çökme) testi TS EN 12350-2 (2019) ve kapiler su emme testi TS EN 772-11(2012) göre yapılmıştır.

Beton basınç dayanımında 7 ve 28 günlük deneyler için her bir karışımda 3' er tane olmak üzere toplamda 6 adet 100x100x100mm küp numune, serbest rötre deneyi için 3' er tane 100x100x280mm dikdörtgen prizma ve kapiler su emme deneyi için 3 adet 100x100x100mm küp numuneler kullanılmıştır.

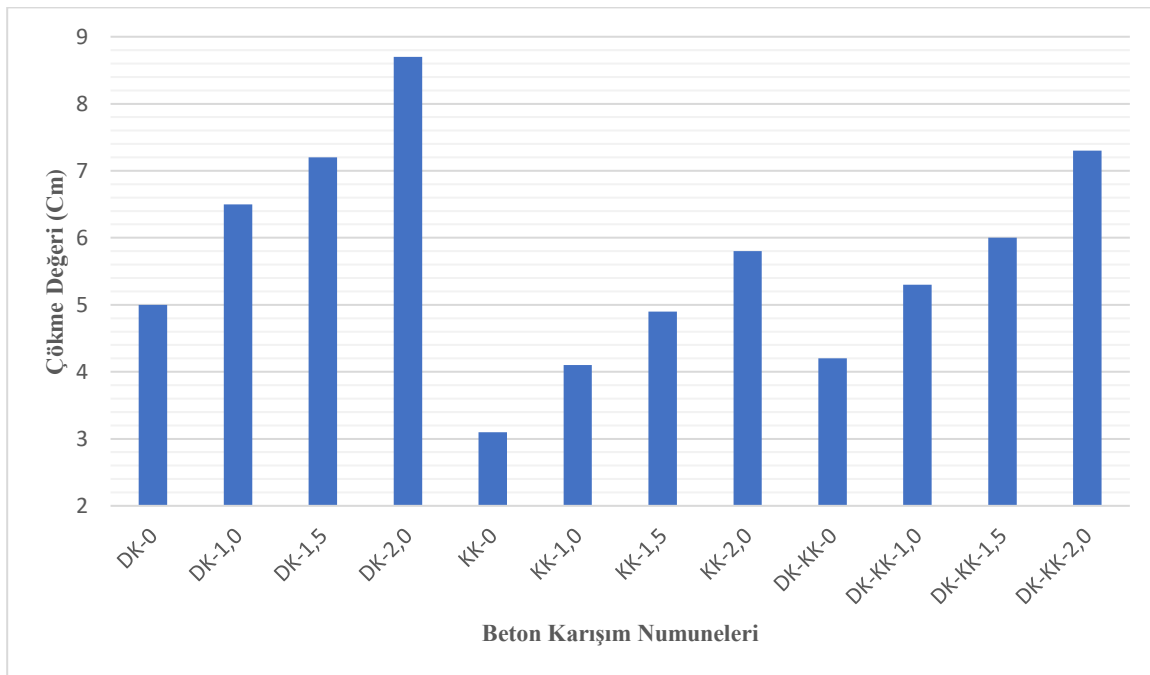
Tablo 5. Beton karışım tasarım ve karışım oranları

Beton Karışımları	Agrega grupları (%)				Çimento kg/ dm ³	Su dm/ dm ³	Kimyasal katkı kg/ dm ³	0-4	0-4	4-11,2	11,2-22,4
	0-4		11,2-22,4					DK	KK	YAA	YAA
	DK	KK	YAA	YAA				kg/ dm ³	kg/ dm ³	kg/ dm ³	kg/ dm ³
DK-0	47	0	24	29	338	203	-	759	-	386	462
DK-1,0	47	0	24	29	338	203	3,38	756	-	384	460
DK-1,5	47	0	24	29	338	203	5,07	753	-	383	459
DK-2,0	47	0	24	29	338	203	6,76	751	-	382	458
KK-0	0	47	24	29	338	203	-	-	844	386	462
KK-1,0	0	47	24	29	338	203	3,38	-	840	384	460
KK-1,5	0	47	24	29	338	203	5,07	-	838	383	459
KK-2,0	0	47	24	29	338	203	6,76	-	835	382	458
DK-KK-0	23,5	23,5	24	29	338	203	-	379	422	386	462
DK-KK-1,0	23,5	23,5	24	29	338	203	3,38	378	420	384	460
DK-KK-1,5	23,5	23,5	24	29	338	203	5,07	377	419	383	459
DK-KK-2,0	23,5	23,5	24	29	338	203	6,76	375	418	382	458

3. Bulgular ve Tartışmalar

3.1 Taze Betonun İşlenebilirlik Özelliği

Yapılan bu çalışmada, doğal kum, kırma kum ve doğal kumu + kırma kum karışımları ile oluşturulan beton karışımlarının işlenebilirliğinin incelenmesi amacıyla çökme (slump) deneyi yapılmıştır. Bütün karışımlarda sabit su miktarıyla, işlenebilirliği sağlamak için çimento ağırlığının %0, %1, %1,5 ve %2 oranlarında yüksek performanslı süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Numuneler üzerinde yapılan çökme deneyi sonuçları **Şekil 1' de** gösterilmiştir.



Şekil 1. Taze beton karışımları çökme ilişkisi

Doğal kum (DK), Kırma kum (KK) ve Doğal kum+ Kırma kum (DK-KK) karışımlarıyla üretilen betonların çökme değerleri birbiriyle karşılaştırıldığında **Şekil 1' de** görüldüğü gibi en yüksek çökme değeri DK' li karışımlarda görülürken en düşük çökme değerleri KK'

li karışımlarda görülmüştür. Bunun nedeni, doğal kum tanesinin yüzey alanının, kırma kum tanesinin yüzey alanına göre daha küçük olmasıdır. Kırma kumun yüzey alanı ve filler malzeme miktarından dolayı karışım suyu ihtiyacı artmaktadır. Başka bir faktör ise doğal kum tanesinin yüzey alanının kırma kumun yüzey alanına göre daha pürüzsüz olmasından dolayı daha kolay işlenebilirlik göstermesidir.

Bütün taze beton karışımlarında en yüksek çökme (slump) değeri DK-2,0 olup 8,7 cm olarak ölçülürken en düşük çökme KK-0 karışımında 3,1 cm ölçülmüştür. Doğal kum ve kırma kumun (DK-KK) birlikte kullanıldığı beton numunelerinin aritmetik ortalaması KK agregalı beton numunelerine oranla %27 fazla olup DK agregalı beton numunelerinin aritmetik ortalamasına oranla %17 düşüktür.

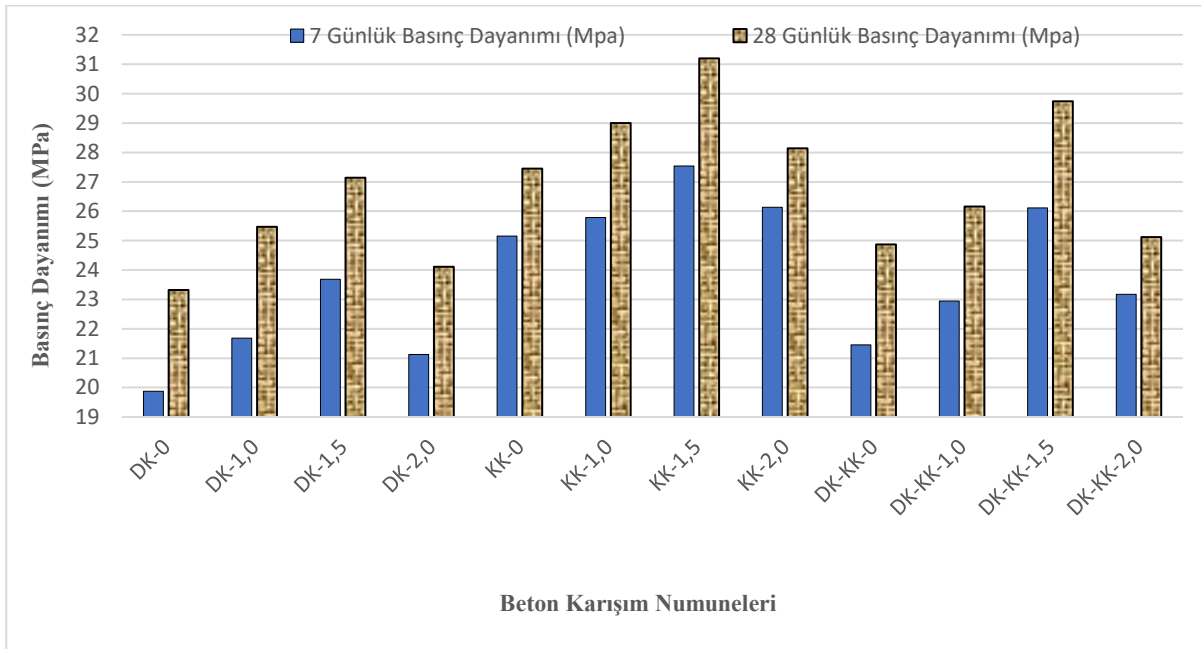
Bu sonuçlara göre doğal kumun işlenebilirliğe olumlu bir katkısı olduğu **Şekil 1**'de açık olarak görülmektedir.

3.2 Sertleşmiş Betonun Özellikleri

Sertleşmiş betonun basınç, yarımada çekme, aşınma direnci, kılcal su emme ve serbest rötre özellikler incelenmiştir. Her bir özellik için aritmetik ortalamalarının grafikleri çizilmiştir.

3.2.1 Basınç dayanım özellikleri

Beton tasarımıyla üretilen deney numunelerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanımları **Şekil 2**'de verilmiştir.



Şekil 2. Beton karışımlarının basınç dayanımı

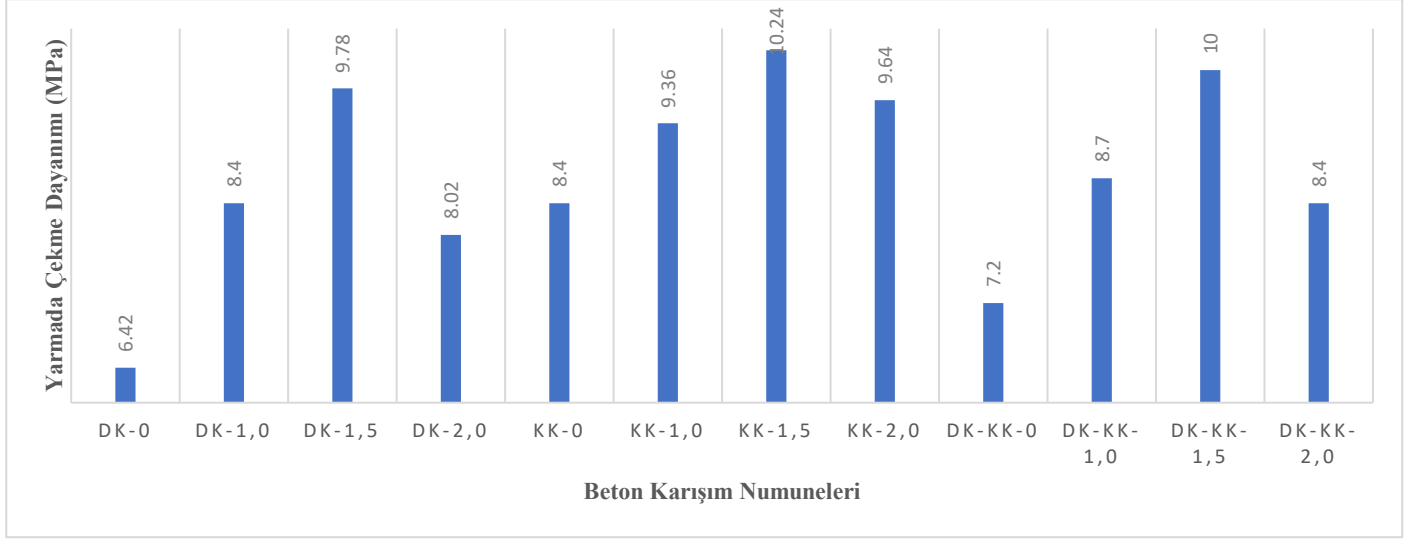
Doğal kum (DK), Kırma kum(KK) ve Doğal kum+ Kırma kum karışımlarıyla üretilen betonların basınç dayanım değerleri birbiriyle karşılaştırıldığında **Şekil 2**'de görüldüğü gibi en yüksek basınç dayanımı değeri KK'lı karışımlarla üretilen beton numunelerinde görülmektedir. En düşük basınç dayanım değerleri ise DK'lı karışımlarla üretilen betonlarda görülmüştür. Basınç dayanımı değerlerinin, ince agrega cinsi bağlamında taze beton çökme değeri ile ilişkilendirmek mümkündür. Yani çökme miktarı KK karışımıyla üretilen betonun çökme değerleri en düşük idi, burada ise en yüksek basınç dayanımı vermiştir. Bunun sebebi kırma agreganın (tane yüzey şekli) çimento hamuru matrisi ile aderansının çok güçlü olması ve aynı zamanda karışımdaki şerbet suyunun diğer karışımlara göre az olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Bütün karışımlarda en yüksek basınç dayanımı %1,5 oranında kimyasal katkı karışımında elde edilmiştir. En düşük dayanımlar ise genel olarak yüksek performanslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmayan (kontrol) beton numunelerinde görülmektedir.

Karışımlarda yüksek performanslı süper akışkanlaştırıcı katkı oranı optimumdan sonra olumsuz etki göstergesi olarak, bütün karışımlarda basınç dayanımının belirli oranda düştüğü görülmüştür. Bunun nedeni, taze beton kalıba yerleştikten sonra betonda kuma meydana gelmesidir. Karışım suyunun kalıp yüzeyine çıkması sırasında agreganın yoğunluğundan dolayı oturma sonucunda segregasyon meydana gelmesidir, yani homojenliğinin bozulması olarak değerlendirilmiştir. Bazı kimyasal katkı maddesi üretici firmaları, yüksek performanslı süper akışkanlaştırıcılar, plastik ve akıcı kıvamı (yani normal hazır betonlarda) betonlarda bağlayıcının % 1' ne kadar kullanabilmesine karşın %2' ye kadar kullanılması durumunda birtakım sıkıntılarının olabileceğini belirtmektedir (Sika® ViscoCrete).

DK, KK ve DK-KK kodlu numuneler arasındaki aritmetik bağıntılar incelendiğinde, KK kodlu numuneler DK kodlu numunelerden %16 fazla, DK-KK kodlu numunelerden ise %9 az olduğu gözlenmiştir. Bu durumun ise kırma kumun doğal kumuna göre daha yoğun, daha büyük yüzey alana sahip ve boşluksuz olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

3.2.2. Yarmada çekme dayanım özelliği

Üretilen betonun yarmada çekme dayanımı numunelerin basınç dayanımına paralellik göstermiştir. Beton karışım sınıflarına göre beton numuneler üzerinde yapılan yarmada çekme dayanımı deney sonuçları **Şekil 3'** de gösterilmiştir.

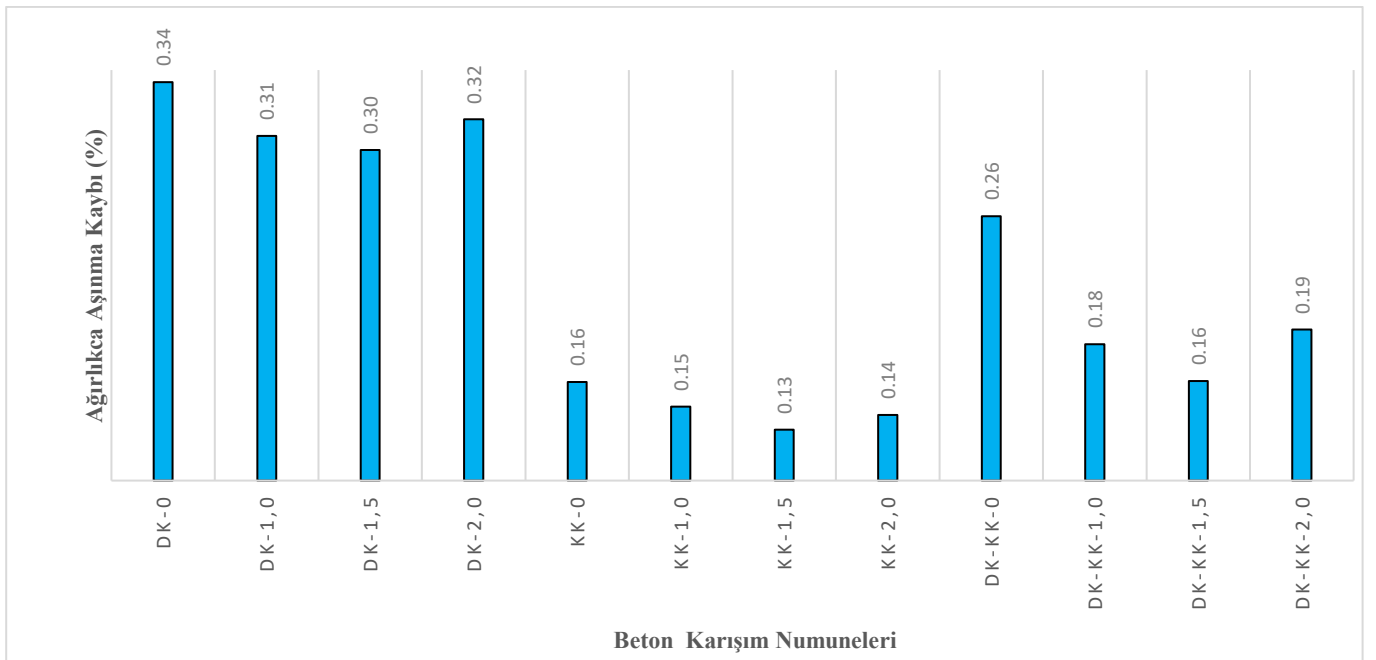


Şekil 3. Yarmada çekme dayanımı testi sonuçları

Şekil 3 incelenip analiz edildiğinde en yüksek yarmada çekme dayanımlarını KK agrega ile üretilen beton numuneleri vermiştir. Bu agrega karışımıyla ve %1,5 yüksek performanslı süperakışkanlaştırıcı kullanılarak üretilen beton numunesinin yarmada çekme dayanımı 10,24 MPa olarak bulunmuştur. En düşük yarmada çekme dayanımlarını DK karışımıyla üretilen beton örnekleri vermiştir. DK – KK agregalı beton karışım numunelerinin yarmada çekme dayanımı DK ile üretilen beton numune değerlerinden büyük olduğu belirlenmiştir. En yüksek yarmada çekme dayanımını KK karışımli betonlar vermiştir. Bunun nedeni kırma kumlarının çimento hamuru ile aderansının güçlü olmasındandır.

3.2.3. Aşınma direnci özelliği

Aşınma dayanımı 28 günlük kür sürelerini tamamladıktan sonra her bir karışımından 3 adet numune üzerinde aşınma deneyi yapılmış olup deney sonuçları **Şekil 4'** de verilmiştir.



Şekil 4. Beton karışım numunelerinin aşınma kaybı

Şekil 4’de görüldüğü gibi üretilen beton karışımlarında agrega bazında en fazla aşınma kaybı doğal kum (DK) karışımıyla üretilen beton numunelerinde görülür iken, en düşük aşınma kaybı kırma kum (KK) karışımıyla üretilen beton numunelerinde görülmektedir. **Şekil 4** incelenip yüksek performanslı süper akışkanlaştırıcı bazında analiz edilirse bütün karışımlarda %1,5 oranıyla üretilen beton numuneleri kendi agrega gruplarıyla üretilen betonlarda en düşük aşınma kaybına sahip olduğu görülmektedir.

Doğal kum karışımıyla üretilen beton numunelerinde aşınma kaybı en fazla DK-0 kodlu numunelerde %0,34 olurken, en düşük aşınma kaybı DK-1,5 kodlu numunelerde % 0,31 olmuştur. DK ile üretilen betonların aşınma kayıpları arasında ciddi fark olmasının ana nedeni çimento hamuru ile doğal kumun aderansını kum yüzeyindeki pürüzlülüğün az olmasından dolayı düşürmesinden kaynaklandığı söylenebilir.

Kırma kum karışımıyla üretilen beton numunelerinin aşınma kaybı DK ile üretilen beton numunelerine göre paralellik göstermektedir. Burada da en fazla aşınma kaybı KK-0 numunelerde %0,16 olurken, en düşük aşınma kaybı KK-1,5 numunelerde %0,13 olmuştur. KK ile üretilen betonların aşınma kayıpları arasında oldukça az fark olduğu **Şekil 4’de** görülmektedir.

Doğal ve kırma kum karışımıyla üretilen beton numunelerinin aşınma kaybı en fazla DK-KK-0 numunelerde %0,26 olurken, en düşük aşınma kaybı DK-KK-1,5 numunelerde %0,16 olmuştur. DK-KK ile üretilen betonların aşınma kayıpları arasındaki fark diğer karışımlardan daha farklıdır. Bunun nedeninin, iki farklı kum çeşidinin beraber kullanılmasından kaynaklandığı söylenebilir.

3.2.4. Kılcal su emme özellikleri

Betonun kılcallığı, su ile temas eden numune yüzeyindeki kılcal boşluklar yoluyla yukarı kısımlara doğru kapiler çekim kuvveti ile yükselir. Bu suyun yükselmesi yani numune bünyesinde ilerlemesi birbiriyle bağlantılı boşluklu malzemelerde çok rastlanılır. Homojen malzemeler, kapiler su emmeye tabi tutulur ise, suyun malzeme bünyesinde yukarı doğru ilerlemesi sıvının Poiseuille rejimine uyduğundanır. Poiseuille rejimine göre, malzeme içerisindeki sıvının yukarı doğru çıkma hızı ile sıvının yüksekliği arasında ters ilişki vardır. Beton karışım tiplerinin kapiler su emme katsayıları **Tablo 6’da** verilmiştir.

Tablo 6. Beton karışımlarının kapiler su emme katsayısı

Beton Karışım Numuneleri	DK-0	DK-1	DK-1,5	DK-2	KK-0	KK-1	KK-1,5	KK-2	DK-KK-0	DK-KK-1	DK-KK-1,5	DK-KK-2
$C_{w,s}$ [g/(m ² .s)]	0,16	0,15	0,13	0,15	0,11	0,10	0,10	0,10	0,15	0,14	0,12	0,14

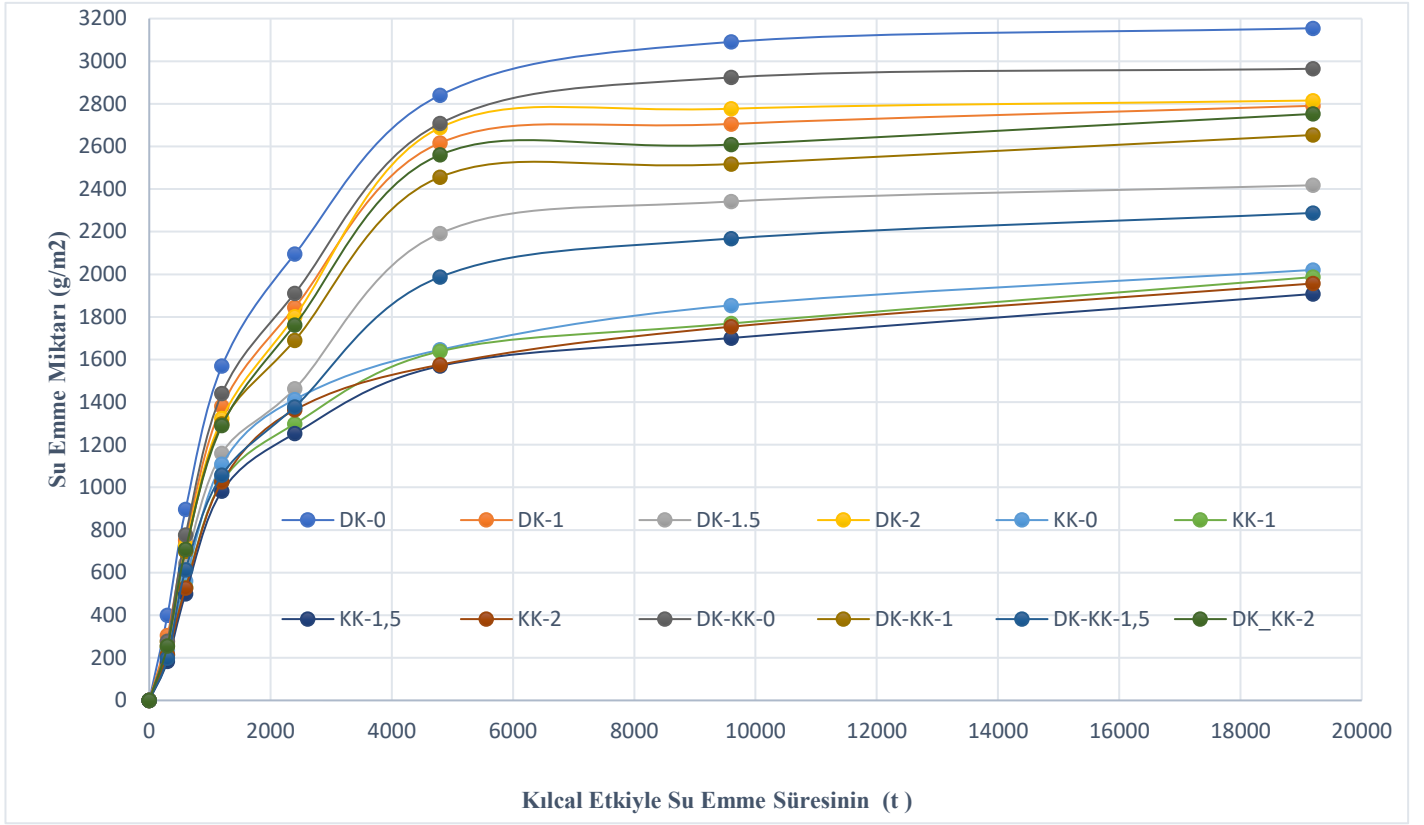
Tablo 6 incelendiğinde, KK ile üretilen akışkanlık kazandırıcı katkı oranı 1,5 olan karışım KK-1,5 en düşük kapiler su emme miktarı elde edilmiş ve kapiler su emme katsayısı ($C_{w,s}$) 0,10 [g/(m².s)] olarak bulunmuştur. En büyük kapiler su emme KK-0 ve kapiler su emmesi katsayısı ($C_{w,s}$) 0,11 [g/(m².s)] dir. İnşaat yıkıntı atığı iri agregası ve doğal kum ve kırma kum kombinasyonu (DK-KK) üretilen beton numuneleri kendi aralarında kapiler su emmeleri açısından karşılaştırdığında DK-KK-1,5’den en düşük kapiler su emme miktarı elde edilmiş ve kapiler su emme katsayısı ($C_{w,s}$) 0,12 [g/(m².s)] olarak bulunmuştur. DK-KK-0 karışımıyla üretilen beton numunesinin kapiler su emmesi bu karışımların en büyük kapiler su emme katsayısı ($C_{w,s}$) 0,15 [g/(m².s)] dir. Beton içerisinde ki boşluğun azalması ve kompakt bir yapı oluşması numunelerin kapiler su emmesini etkilemektedir.

Doğal kumlu karışım numunelerin kapiler su emme katsayıları Tablo 6’da verilmiştir. Bu katsayılar sırasıyla DK-0 ($C_{w,s}$) 0,16 [g/(m².s)], DK-1($C_{w,s}$) 0,15 [g/(m².s)], DK-1,5 ($C_{w,s}$) 0,13 [g/(m².s)], ve DK-2($C_{w,s}$) 0,15 [g/(m².s)], olduğu görülmektedir. Akışkanlaştırıcı katkı oranı %2 (DK-2) olan numunelerin kılcal su emmeleri diğer akışkanlaştırıcılar arasında en yükseğidir. Bunun sebebi azda olsa taze beton yerleştirildikten sonra kuma meydan gelmesi ve kılcal boşlukların meydana gelmesidir. Buda kapiler su emmeyi artırmaktadır.

Yıkıntı atığından elde edilen iri agrega ve doğal kum karışımıyla üretilen DK-1,5’ den en yüksek kapiler su emme miktarı elde edilmiştir. DK-0’ da ise en düşük kapiler su emme meydana gelmiştir. Kırma kumla (KK) ile üretilen beton numunelerinin DK numunelerinden daha az kapiler su emdiği görülmektedir. Kapiler su emme, aşınma kaybı ve basınç dayanımı özelliklerinin aynı numunelerde birbirine paralel olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada, karışımlarla üretilen numunelerin kapiler su emme, aşınma kaybı, yarmada çekme ve basınç dayanımı özellikleri aynı numunelerde birbirine paralellik göstermiştir.

Araştırmada kullanılan numunelerin kapiler su emme test sonuçlarına bağlı olarak kılcal su emme miktarı- kapiler su emme süresi ilişkisi ise **Şekil 5’ de** verilmiştir.



Şekil 5. Beton karışımlara tiplerinin kılcal su emme grafiği

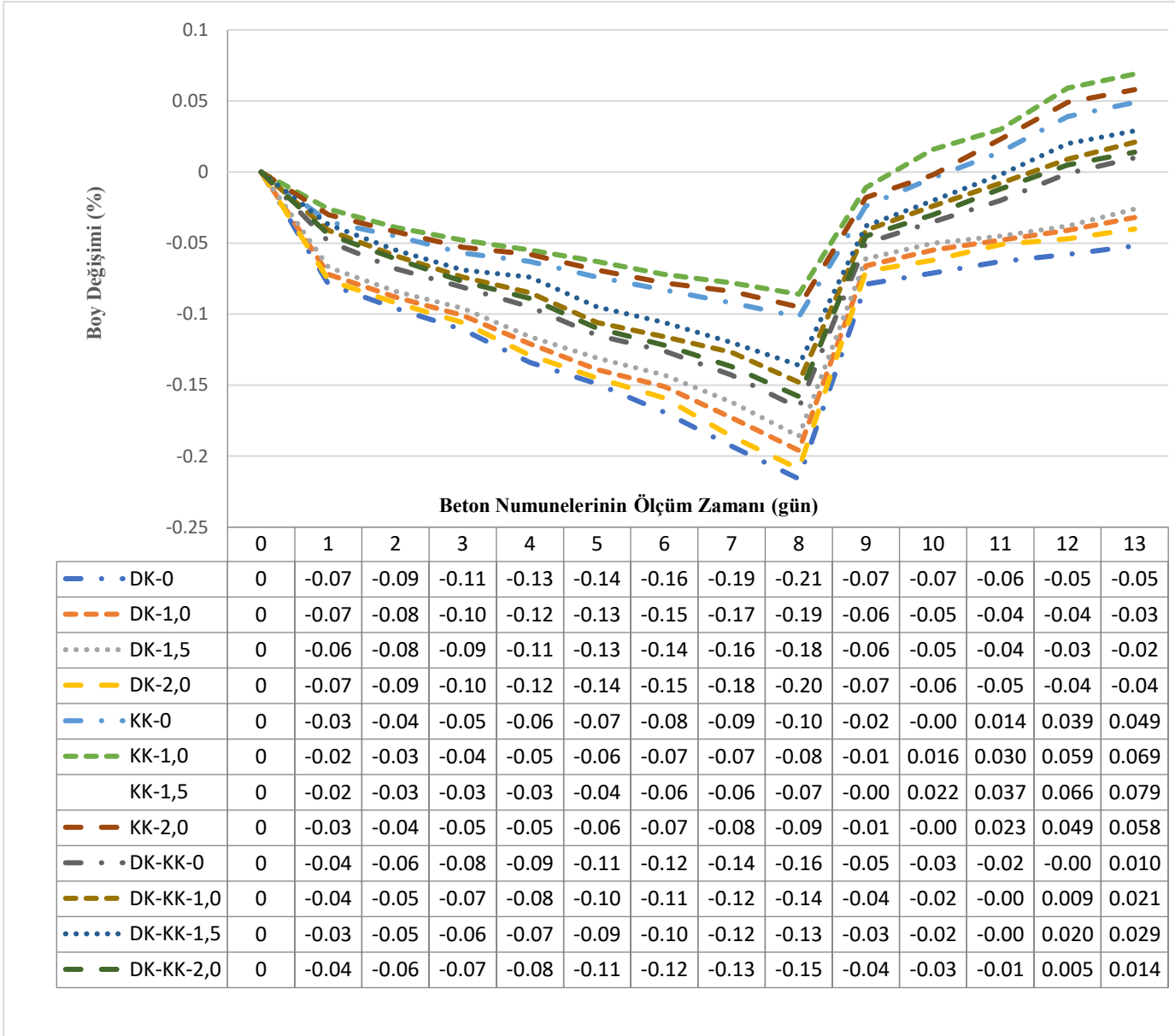
Şekil 5 incelendiğinde, bütün numunelerde ilk 1200 saniyede (20 dakika) kapiler su emme hızı oldukça yüksek ve birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Kapiler su emme süresi 2400 saniyeye (40 dakikaya) ulaştığında kapiler su emme hızı karışımda kullanılan ince agrega ve katkı oranına bağlı olarak değişmektedir. Su emme süresi 4800 saniyeye (80 dakikaya) ulaştığında kapiler su emme hızı zamana bağlı olarak yatay doğrultuya yaklaşmıştır. Karışımda kullanılan ince agrega ve katkı oranına bağlı olarak su emmedeki farklılığın büyük ölçüde ortaya çıktığı açıkça şekilde görülmektedir. Kapiler su emme süresinin 19200 saniyeye (320 dakikaya) ulaştığında tam olmasa da yatay doğrultuya oldukça yaklaştığı görülmüştür.

3.2.5 Serbest rötre özelliği

Rötre deneyleri kapsamında her bir karışım için hazırlanan numunelerin su içindeki serbest boy değişimi incelenmiştir. Serbest rötre numune uzunluğunun en kesit boyutlarından daha büyük olması halinde rötrenin yalnız uzunluk doğrultusunda meydana geleceği kabul edilmiş ve buna göre lineer deformasyon ölçümleri yapılmıştır (Türker & Felekoğlu, 2004). Bu çalışmada elde edilen sonuçlar iki grafik şeklinde verilmiştir. İlk serbest rötre grafiği olan Şekil 6' da günlük bazda ölçülen yüzdesel boy değişim verileri ile birlikte verilir iken, ikinci grafik olan Şekil 7'de deney ilk boy ölçümü ile son ölçüm farkının yüzdesi olarak verilmiştir.

Şekil 6 incelenip değerleri analiz edildiğinde DK-0 karışımı numunelerin ilk günkü ortalama boy değişimi -0,07 iken 14 dördüncü gün -0,04 olduğu görülmektedir. Bunun yanında 8 güne kadar boyda büzülme meydana gelirken bu günden sonra numune boyunda uzamaya geçiş başlamıştır. Diğer DK ile yapılan karışım numunelerde aynı paralel davranış gözlenmiştir.

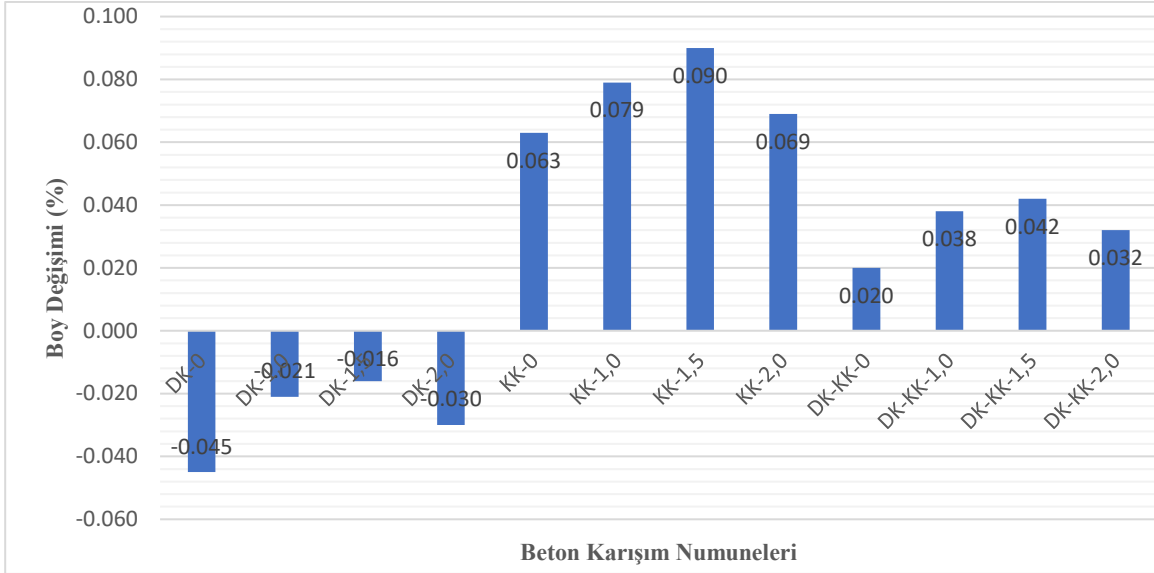
KK-0 karışımı numunelerin ilk günkü boy değişimi -0,03 iken 14 dördüncü gün 0,063 olduğu görülmektedir. Numunelerin ilk 8 güne kadar boyda büzülme şeklinde serbest rötre meydana gelirken 9.cu günden sonra numunelerde serbest rötre boy uzaması geçiş başlamıştır. Diğer KK ile yapılan karışım numunelerde aynı paralel davranış gözlenmiştir. En büyük serbest uzama rötresi KK-1,5 karışımı beton numunelerinde meydana gelmiştir.



Şekil 6. Bütün karışımlara ait serbest rötre yüzde değerleri ve grafiği

DK-KK kombinli karışımların serbest rötre yüzdeleri Şekil 6 incelenip değerleri analiz edildiğinde DK-KK-0 karışımı numunelerin diğer karışımlarda olduğu gibi ilk günkü ortalama boy değişimi -0,04 iken 14 dördüncü gün 0,020 olduğu görülmektedir. Bunun yanında 8 güne kadar boyda büzülme meydana gelirken bu günden sonra numune boyunda uzamaya geçiş başlamıştır. Diğer DK-KK kombinli karışım numunelerinde de aynı paralel davranış gözlenmiştir.

Su içinde bekleyen numunelerin hepsinde çimento jelleri tarafından emilen su nedeniyle belli bir yaşa kadar şişme (negatif rötre) meydana gelmiştir. DK ile üretilen betonların rötre okuma kayıtlarında ilk günlerde negatif rötrein meydana geldiği ve deneyin son günlerine doğru bu değişimin minimum değere ulaştığı gözlenmiştir. Şekil 7 incelenip analiz edildiğinde, DK numunelerinin son günkü negatif değişim yüzdesi yanında, KK ve DK-KK 'lı karışımlar ile üretilen numunelerin boy değişiminde pozitif bir artış görülmektedir. Bu artışlar KK ile üretilen karışımlarda en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Beton karışımlarının basınç dayanımı, kapiler su emme özellikleri ile serbest rötre ilişkilendirildiğinde betonun boşluklu yapısı ile bu özellikleri arasında bağıntı kurmak mümkündür. Boşluğu fazla olan betonun numunesinin basınç dayanımı düşük, kapiler su emmesi yüksek, boy değişimi azdır. Dolayısı ile numune içindeki boşluk ile boy değişimi arasında bir ilişki kurulabilir. Boşluğu az olan numunenin basınç dayanımı yüksek, serbest rötresi yüksek, kılcal su emmesi düşüktür.



Şekil 7. Beton karışım numunelere ait toplam boy değişim grafiği

Şekil 7 incelenip analiz edildiğinde boy değişim oranının en az olduğu numuneler KK kodlu numuneler olup, en fazla boy değişimi sergileyen numunelerin ise DK kodlu numuneler olduğu dikkat çekmektedir.

Maksimum boy değişimi gösteren numune KK-1,5, minimum boy değişimi gösteren numune ise DK-1,5 olarak görülebilmektedir.

Suda bekleyen çimento harçlarının emilen suyun belli bir yaşa kadar negatif (şişme) rötre oluşturduğu ve 8. Günün sonunda minimum değere ulaştığı gözlenmiştir. Daha sonra numuneler büzülerek negatif rötre normal rötreye dönüşmüş ve 14.cü günün sonunda 1. gündeki değerlere ulaşmış, geçmiştir.

4. Sonuç ve Öneriler

Doğal kum, betonun işlenebilirliğini kolaylaştırmaktadır. Kırma kum, betonun işlenebilme yeteneğini olumsuz etkilemektedir. Doğal kum ile kırma kum karışımıyla üretilen betonun işlenebilirliği kırma kumla üretilen betondan yüksek, doğal kum karışımıyla üretilen beton işlenebilirliğinden ise düşüktür.

Karışımında kullanılan süperakışkanlaştırıcı oranı arttıkça bütün karışımların işlenebilirliği artmıştır.

Doğal kum karışımıyla üretilen betonların özellikleri diğer karışımlara göre en düşük performansa sahiptir. DK-1,5 karışımı ile üretilen betonların ise daha yüksek olduğu saptanmıştır.

Kırma kum karışımıyla üretilen betonların özellikleri diğer karışımlara göre en yüksek performansı göstermiştir. KK-1,5 karışımı ile üretilen betonun mekanik ve fiziksel özellikleri diğer kumlarla üretilen betonlardan daha yüksektir.

Doğal + kırma kum karışımıyla üretilen betonların özellikleri kırma kum ile üretilen betonlardan düşük iken doğal kum ile üretilen betonlardan yüksektir.

Sonuç olarak; iri agrega yıkıntı atığı ince agrega kırma kum ve % 1,5 yüksek performanslı süper akışkanlaştırıcı oranıyla üretilen betonların mekanik ve fiziksel özellikleri istenilen performansı sağlamıştır.

İnşaat yıkıntı atığı olan molozların içinde, kil (toprak) bulunması durumunda geri dönüşüm agregası kullanılmadan önce kilden arındırılmalıdır. GDA'nın, ince agregalar ile kullanılması durumunda kireç, alçı ve boya gibi atıklara karşı yıkanmalı veya beton içinde zararlı atıkların bulunması durumunda bu malzemelere karşı gerekli önlemler alınmalıdır.

Referanslar

ASTM C944/C944M-19. (2019). Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method.

Çelik B. (2001). Recycled Aggregate Concrete at Elevated Temperatures. Doktora Tezi. Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul

Demirel C., Toklu K. & Şimşek O. (2015). Geri dönüşüm agregasının beton üretiminde kullanılabilirliği ve sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi. *2nd International Sustainable Buildings Symposium*. 42-47 Retrieved from <http://www.isbs2015.gazi.edu.tr/belgeler/bildiriler/42-47.pdf>

Demirel C. & Şimşek O. (2014). C30 sınıfı atık betonun geri dönüşüm agregası olarak beton üretiminde kullanılabilirliği. *S.Ü. Müh. Bilim ve Teknik. Dergisi*. 2(2), 45-54. Retrieved from <http://sujest.selcuk.edu.tr/sumbtd/article/view/256/380>

Devlet Planlama Teşkilatı. (2000). DPT VIII. Beş Yıllık Kalkınma Planı (2001 -2005), Ankara. Retrieved from https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2018/11/08_Ulastirma.pdf

Devlet Planlama Teşkilatı (DPT). (2007). Dokuzuncu Kalkınma Planı 2007-2013, Ankara. Retrieved from <https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2018/11/Dokuzuncu-Kalk%C4%B1nma-Plan%C4%B1-2007-2013%E2%80%8B.pdf>

Durmuş G., Şimşek O. & Can Ö. (2009). Geri dönüşüm agregalardan üretilen farklı sınıflardaki betonun mühendislik özelliklerinin belirlenmesi. *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)* 2103-2106. Retrieved from <https://docplayer.biz.tr/7924394-Iats-09-edited-by-mustafa-acarer-halil-ibrahim-demirci-cevdet-gologlu-copyright-2009-iats-09-isbn-978-605-60681-0-2.html>

Esra, Ö. & Şenol, Y. (2008). İnşaat yıkıntı atıklarının yönetimi ve planlanan istanbul modeli. *Kent Yönetimi, İnsan ve Çevre Sorunları* "08 Sempozyumu, 413-419, 02-06 Kasım 2008, İstanbul. Retrieved from https://istac.istanbul/contents/44/cevre-makaleleri_130838595529678877.pdf

Lauritzen, K. E. (1994). *Reuse of Concrete and Masonary*. Great-Britain: St. Edmundsbury Pres.

Kou S.C., Poon C.S. & Chan D.C. (2007). Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete. *ASCE Journal of Material In Civil Engineering*, 19(9), 709-715. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:9\(709\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:9(709))

Maçın, K. E., & Demir, İ. (2018). Kentsel dönüşüm sürecinde istanbul'da inşaat ve yıkıntı atıkları yönetimi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2018), 188-201 Retrieved from <http://dSPACE.adiyaman.edu.tr:8080/xmlui/handle/20.500.12414/527>

Ölmez E., & Yıldız Ş., (2008). İnşaat yıkıntı atıklarının yönetimi ve planlanan İstanbul modeli. *Kent Yönetimi, İnsan ve Çevre Sorunları*"08 Sempozyumu 02-06 Kasım 2008

Resmi gazete (2012) . <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2012/05/20120531-1.htm> erişim tarihi 10.02.2021

Şüme E. (2016). Geri dönüşüm agregasının beton yol kaplamasında kullanılabilirliği. Yüksek Lisans Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

Sika (2007) ViscoCrete® -SF 18 Üçüncü nesil yüksek performanslı beton ve harç katkıdır. Ürün Bilgi Föyü. <https://heris.com.tr/Resimler/2d9557f65cSika%20Viscocrete%20SF%2018%2020072201%20TR.pdf>

Sonawane, T.R., & Pimplikar, S.S.,(2013) "Use of Recycled Aggregate Concrete", *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2278-1684, pp: 52-59.

Şimşek, O. (2020). *Beton ve Beton Teknolojisi* (5. baskı). Ankara, Seçkin Yayıncılık San. ve Tic. A.Ş.

TS EN 933-1. (2015). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler-Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini - Eleme yöntemi, TSE. Ankara

TS EN 1097-6. (2015). Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler-Bölüm 6:Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini, TSE. Ankara

TS EN 933-3. (2015). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 3: Tane şekli tayini - Yassılık endeksi, TSE. Ankara

TS EN 1097-2. (2015). Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 2: Parçalanma direncinin tayini için metotlar, TSE. Ankara

TS EN 933-9+A1:2013. (2014). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 9: İnce malzeme tayini - Metilen mavisi deneyi, TSE. Ankara

TS 802 (2016). Beton karışım tasarımı hesap esasları, TSE. Ankara

TS EN 12350-2, (2019). Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi, TSE. Ankara

TS EN 12390-3, (2019). Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini, TSE. Ankara

TS EN 772-11, (2012). Kâgir birimler - Deney yöntemleri - Bölüm 11: Betondan, gaz betondan, yapay ve doğal taştan yapılmış kâgir birimlerde kapiler su emme ve kil kâgir birimlerde ilk su emme hızının tayini, TSE. Ankara

TS ISO 1920-8, (2011). Beton deneyleri - Bölüm 8: Şantiyede veya laboratuvarında hazırlanan numuneler için betonun kuruma büzülmesinin tayini, TSE. Ankara

TS EN 12390-6, (2010). Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, TSE. Ankara

Türkel, S , & Felekoğlu, B . (2004). Aşırı dozda akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımının taze ve sertleşmiş betonun bazı özellikleri üzerine etkileri. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 6 (1) , 77-89 . Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/deumffmd/issue/40877/493539>



An Improved Algorithm for Minimizing Makespan on Flowshops with Uncertain Processing Times

Ali Allahverdi*¹ , Muberra Allahverdi² 

¹Department of Industrial and Management Systems Engineering, Kuwait University, P.O. Box 5969, Safat, Kuwait

²Department of Mathematical Sciences, School of Natural Sciences, Kean University, 1000 Morris Ave, Union, NJ 07083, USA

Başvuru/Received: 01/03/2021

Kabul / Accepted: 27/03/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 23/05/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Abstract

We address the four-machine flowshop scheduling problem with the objective of minimizing makespan with uncertain processing times. The problem was investigated in the literature (RAIRO Operations Research 54, 529-553) and different algorithms were proposed. In this paper, we propose a new algorithm for the problem. The new proposed algorithm is compared with the best existing algorithm in the literature by using extensive computational experiments. Computational experiments show that the new proposed algorithm performs much better than the best existing algorithm in the literature in terms of error while both have the same computational time. Specifically, the new proposed algorithm reduces the error of the best existing algorithm in the literature about 40%. This result has been confirmed by using hypotheses testing with a significance level of 0.01.

Key Words

“Makespan, scheduling, algorithm, uncertainty”

1. Introduction

About seventy percent of the real life of scheduling problems fall in the category of flowshops, Fuchigami and Rangel (2018). There are several real life flowshop scheduling problems with four stages, i.e., with four machines, e.g., Stefansson (2011). In the current paper, we study the flowshop scheduling problem (having four-machine) with makespan performance measure, which helps in decreasing production costs.

One of the assumptions made in the literature is that processing times of jobs are deterministic. On the other hand, often real world manufacturing environments are most of the times subject to an extensive uncertainties, Gonzalez-Neira et al. (2017), Mahjoub et al. (2011). Therefore, the assumption of deterministic processing times is not realistic for all flowshop environments. Moreover, assuming processing times follow certain distributions is not legitimate for some flowshop scheduling environments, e.g., Kouvelis and Yu (1997). Therefore, processing times need to be considered as uncertain.

In an uncertain environment, job processing times are considered to be random variables but their probability distributions are unidentified. If $t_{j,k}$ indicates job j 's processing time ($j=1,2, \dots,n$) on machine k ($k=1,2, \dots,m$). Similarly, if LBt_j shows the lower bound and $UBt_{j,k}$ shows the upper bound of $t_{j,k}$. Then, $t_{j,k}$ satisfies $LBt_{j,k} \leq t_{j,k} \leq UBt_{j,k}$.

Allahverdi and Sotskov (2003) and Allahverdi and Aydilek (2010a) investigated the problem of $F2|LBt_{j,k} \leq t_{j,k} \leq UBt_{j,k}|C_{max}$. Allahverdi and Aydilek (2010a) presented several algorithms and Allahverdi and Sotskov (2003) presented some dominance relations for the problem. Moreover, Allahverdi and Aydilek (2010b) provided different algorithms for the problem of $F2|LBt_{j,k} \leq t_{j,k} \leq UBt_{j,k}|L_{max}$. Also, Aydilek and Allahverdi (2010) provided several heuristics while Sotskov et al. (2004) presented several dominance relations for the problem of $F2|LBt_{j,k} \leq t_{j,k} \leq UBt_{j,k}|\sum C_i$. On the other hand, the problem of $F3|LBt_{j,k} \leq t_{j,k} \leq UBt_{j,k}|\sum C_i$ was investigated by Sotskov et al. (2004) where they provided few dominance relations for problem. For some other uncertain scheduling environments, the problem was investigated as well in the literature, e.g., Allahverdi and Allahverdi (2018), Aydilek et al. (2013, 2015, 2017), Lai and Sotskov (1999), Lai et al. (1997).

The $F4|prmu, Lt_{j,k} \leq t_{j,k} \leq Ut_{j,k}|C_{max}$ problem was recently investigated by Allahverdi and Allahverdi (2020). They established some dominance relations and presented different algorithms. They indicated that one of their proposed algorithms performs as the best. In the current paper, we propose a new algorithm and indicated that the new algorithm performs better than the best algorithm of Allahverdi and Allahverdi (2020).

The proposed new algorithm is explained in the succeeding section. Next, computational experiments are given in the third section. Finally, conclusions along with some possible extensions to the problem are provided in Section 4.

2. Proposed New Algorithm

The investigated problem was first studied by Allahverdi and Allahverdi (2020). They presented 12 algorithms and compared the 12 algorithms with each other. They showed that one of the algorithms, called Algorithm A7, performed as the best algorithm. We represent their Algorithm A7 by OA. In this section, we propose a new algorithm, which we call it New Algorithm (NA). The steps of NA are given below.

NA Statements

The $LBt_{i,k}$ and $UBt_{i,k}$ values are given where i denotes the number of jobs and k denotes the number of machine

For for $i=1, \dots, n$ let

$$pfm_i = l_1((LBt_{i,1} + UBt_{i,1})/2) + l_2((LBt_{i,2} + UBt_{i,2})/2)$$

$$psm_i = l_3((LBt_{i,3} + UBt_{i,3})/2) + l_4((LBt_{i,4} + UBt_{i,4})/2)$$

End For

Let s_u and s_a denote unassigned and assigned sequences where initially, $s_u = \{1, 2, \dots, n\}$ and $s_a = \phi$

Let $poz_1 = 1$, and $poz_2 = poz_3 = zero$

While $poz_3 < n$,

Let $pfm_m = \text{minimum}\{pfm_i\}$ and $psm_m = \text{minimum}\{psm_i\}$ where $i \in s_u$

If $pfm_m \leq psm_m$, put that job in the sequence s_a , in position poz_1

and let $poz_1 = poz_1 + 1$

Else put that job in the sequence s_a , in position $n - poz_2$

and let $poz_2 = poz_2 + 1$

Delete the job from the sequence s_u

Let $poz_3 = poz_3 + 1$

End While

Assign the only job remaining in s_u to the last remaining position in s_a . The sequence s_a is the solution of the algorithm NA.

The values of $l_1, l_2, l_3,$ and $l_4,$ used to compute pfm_i and psm_i in the algorithm NA, are investigated by fine-tuning their values. The values from 0 to 1 with the increments of 0.1 were investigated for each of $l_1, l_2, l_3,$ and $l_4.$ It was found that the values of $l_1=0.8, l_2=0.2, l_3=0.2$ and $l_4=0.8$ were the best for the algorithm. Hence, these values are used for the NA algorithm in the computational section.

3. Algorithm Evaluations

Our newly proposed algorithm NA and the best existing algorithm OA are compared in this section. For the computational experiments, we use the same parameters that were used in evaluating algorithm OA for a fair comparison. Aydilek et al. (2017) used similar experimental parameters that we use in this paper.

$UBt_{i,k}$'s are generated from a uniform distributions $U(D+1, 100).$ On the other hand, $LBt_{i,k}$'s are taken from a uniform distribution $U(1, UBt_{i,k} - D)$ where D is set at the values of 40, 30, 20, or 10. D indicates the difference between bounds (lower and upper) on processing times. These four values of gaps were also used in the evaluation of OA. Once the lower bounds and upper bounds are generated, instances of processing times are required to be generated for computational purposes. To generate instances of processing times only using a single distribution is misleading since processing times are uncertain. Therefore, they are generated using normal, positive linear, uniform, and negative linear distributions. The uniform and normal distributions are representative for symmetric distributions while the other two distributions are representative for skewed distributions.

We consider six values for n as 300, 400, 500, 600, 700, 800. Furthermore, we consider four values of 40, 30, 20, and 10 for $D.$ Moreover, there are four considered distributions. Hence, we have in total 96 ($4*4*6$) combinations. 1000 replications were generated for each combination, which resulted in a total of 96,000 generated problems.

The algorithms OA and NA were compared by both performance measures of Error (average error) and Std (standard deviation). The error was expressed as (algorithm's makespan – minimum makespan) / minimum makespan. The computational results are provided in Table 1-4, for uniform, normal, negative linear, and positive linear distributions. In the tables, the first column indicates the number of jobs, the second column denotes the difference between the upper and lower bounds of processing time, the third and fourth columns show the errors of OA and NA, respectively. The fifth and sixth columns represent the standard deviations of the OA and NA. Finally, the last column shows the percentage improvement in error of NA over OA.

The summarized computational results are presented in Figure 1-4. It is clear from the figures that the new algorithm NA performs much better than the existing algorithm OA. The overall percentage improvement of the proposed algorithm NA over the existing algorithm OA is 38.61 %. It is clear from the figures that the algorithm's performance does not alter much either with the number of jobs or the difference of the upper and lower bounds of job processing times. Figure 5 summarizes the results in terms of the distributions and delta while Figure 6 summarizes the results in terms of the distributions and job numbers.

The new algorithm NA and the existing algorithm in the literature OA were also statistically compared by utilizing a two-sample t test. The next hypotheses were performed to compare the performances of the both algorithms OA and NA.

$$H_0: \mu(NA) = \mu(OA)$$

$$H_1: \mu(NA) < \mu(OA)$$

where $\mu(\text{Algorithm-h})$ symbolizes Algorithm-h's average error. The null hypothesis H_0 was rejected at a significance level (α) of 0.01 for all n and Δ combinations.

Table 1. Experimental results - Normal Distribution

n	D	Error of OA	Error of NA	Std of OA	Std of NA	% Improvement
300	10	0.1048	0.0639	0.0021	0.0015	39.0115
300	20	0.1000	0.0596	0.0020	0.0014	40.4189
300	30	0.0757	0.0469	0.0016	0.0011	38.0926
300	40	0.0765	0.0464	0.0016	0.0011	39.2996
400	10	0.0855	0.0487	0.0017	0.0011	43.0434
400	20	0.0717	0.0421	0.0015	0.0010	41.2755
400	30	0.0667	0.0398	0.0013	0.0010	40.2993
400	40	0.0605	0.0397	0.0011	0.0009	34.3207

Table 1 (cont). Experimental results - Normal Distribution

n	D	Error of OA	Error of NA	Std of OA	Std of NA	% Improvement
500	10	0.0711	0.0474	0.0016	0.0011	33.3315
500	20	0.0640	0.0330	0.0013	0.0008	48.3936
500	30	0.0624	0.0340	0.0012	0.0008	45.4520
500	40	0.0538	0.0330	0.0011	0.0007	38.6690
600	10	0.0748	0.0386	0.0015	0.0009	48.3881
600	20	0.0633	0.0317	0.0012	0.0008	49.9877
600	30	0.0532	0.0312	0.0011	0.0008	41.4104
600	40	0.0486	0.0290	0.0010	0.0007	40.3749
700	10	0.0592	0.0374	0.0013	0.0008	36.8286
700	20	0.0504	0.0322	0.0010	0.0007	36.1635
700	30	0.0480	0.0286	0.0010	0.0007	40.3868
700	40	0.0485	0.0294	0.0010	0.0007	39.3579
800	10	0.0557	0.0293	0.0012	0.0007	47.3078
800	20	0.0512	0.0275	0.0011	0.0007	46.3253
800	30	0.0447	0.0235	0.0009	0.0006	47.4913
800	40	0.0423	0.0225	0.0008	0.0005	46.7650

Table 2. Experimental results - Uniform Distribution

n	D	Error of OA	Error of NA	Std of OA	Std of NA	% Improvement
300	10	0.1113	0.0683	0.0023	0.0015	38.5890
300	20	0.1012	0.0863	0.0021	0.0020	14.7158
300	30	0.0986	0.0826	0.0020	0.0018	16.1901
300	40	0.1049	0.0953	0.0019	0.0020	9.1123
400	10	0.0883	0.0544	0.0017	0.0013	38.4200
400	20	0.0913	0.0516	0.0019	0.0011	43.5368
400	30	0.0805	0.0545	0.0016	0.0012	32.2359
400	40	0.0909	0.0661	0.0016	0.0014	27.2762
500	10	0.0831	0.0439	0.0017	0.0011	47.2228
500	20	0.0757	0.0470	0.0015	0.0011	37.9654
500	30	0.0727	0.0455	0.0015	0.0010	37.3814
500	40	0.0753	0.0592	0.0014	0.0012	21.3773
600	10	0.0727	0.0416	0.0014	0.0010	42.8160
600	20	0.0671	0.0412	0.0013	0.0010	38.6796
600	30	0.0646	0.0474	0.0013	0.0011	26.6545
600	40	0.0721	0.0414	0.0014	0.0009	42.6536
700	10	0.0674	0.0349	0.0014	0.0009	48.2614
700	20	0.0627	0.0344	0.0013	0.0008	45.1832
700	30	0.0698	0.0359	0.0013	0.0008	48.5508
700	40	0.0615	0.0401	0.0012	0.0009	34.7529

Table 2 (cont.). Experimental results - Uniform Distribution

n	D	Error of OA	Error of NA	Std of OA	Std of NA	% Improvement
800	10	0.0579	0.0382	0.0013	0.0009	34.0963
800	20	0.0589	0.0306	0.0011	0.0007	48.0392
800	30	0.0555	0.0312	0.0010	0.0007	43.7571
800	40	0.0589	0.0353	0.0011	0.0008	40.1509

Table 3. Experimental results - Positive Linear Distribution

n	D	Error of OA	Error of NA	Std of OA	Std of NA	% Improvement
300	10	0.0909	0.0599	0.0020	0.0014	34.1019
300	20	0.0787	0.0568	0.0016	0.0013	27.8308
300	30	0.0815	0.0584	0.0016	0.0012	28.3393
300	40	0.0801	0.0542	0.0016	0.0012	32.3999
400	10	0.0723	0.0513	0.0016	0.0012	29.0390
400	20	0.0751	0.0431	0.0015	0.0010	42.5667
400	30	0.0615	0.0390	0.0011	0.0008	36.6554
400	40	0.0630	0.0418	0.0012	0.0010	33.7081
500	10	0.0641	0.0431	0.0014	0.0011	32.7232
500	20	0.0676	0.0392	0.0013	0.0009	41.9713
500	30	0.0581	0.0408	0.0012	0.0009	29.7391
500	40	0.0650	0.0318	0.0012	0.0007	51.0430
600	10	0.0651	0.0361	0.0014	0.0009	44.5162
600	20	0.0634	0.0340	0.0012	0.0008	46.3306
600	30	0.0507	0.0363	0.0010	0.0008	28.4212
600	40	0.0533	0.0300	0.0010	0.0007	43.6218
700	10	0.0567	0.0320	0.0012	0.0008	43.5140
700	20	0.0502	0.0311	0.0011	0.0007	38.1106
700	30	0.0451	0.0277	0.0009	0.0006	38.5470
700	40	0.0448	0.0281	0.0008	0.0006	37.1593
800	10	0.0607	0.0312	0.0012	0.0008	48.6142
800	20	0.0510	0.0265	0.0010	0.0006	48.0716
800	30	0.0474	0.0217	0.0009	0.0005	54.3399
800	40	0.0406	0.0247	0.0007	0.0005	39.2330

Table 4. Experimental results - Negative Linear Distribution

n	D	Error of OA	Error of NA	Std of OA	Std of NA	% Improvement
300	10	0.1242	0.0744	0.0026	0.0017	40.0813
300	20	0.1118	0.0720	0.0022	0.0016	35.6125
300	30	0.1132	0.0787	0.0021	0.0018	30.4638
300	40	0.1127	0.0819	0.0021	0.0017	27.2850

Table 4 (cont.). Experimental results - Negative Linear Distribution

n	D	Error of OA	Error of NA	Std of OA	Std of NA	% Improvement
400	10	0.0998	0.0550	0.0021	0.0014	44.8716
400	20	0.1063	0.0525	0.0021	0.0012	50.5669
400	30	0.0880	0.0610	0.0017	0.0013	30.6426
400	40	0.0999	0.0637	0.0017	0.0015	36.2614
500	10	0.0864	0.0418	0.0017	0.0010	51.5902
500	20	0.0761	0.0493	0.0016	0.0011	35.1628
500	30	0.0748	0.0560	0.0014	0.0012	25.1616
500	40	0.0804	0.0651	0.0015	0.0014	19.1128
600	10	0.0807	0.0449	0.0017	0.0011	44.4261
600	20	0.0805	0.0431	0.0016	0.0011	46.5258
600	30	0.0851	0.0427	0.0016	0.0010	49.8085
600	40	0.0754	0.0524	0.0014	0.0011	30.5661
700	10	0.0792	0.0419	0.0016	0.0010	47.0908
700	20	0.0670	0.0375	0.0013	0.0009	44.1186
700	30	0.0826	0.0395	0.0015	0.0010	52.2542
700	40	0.0712	0.0456	0.0015	0.0010	35.9916
800	10	0.0640	0.0398	0.0013	0.0010	37.7042
800	20	0.0582	0.0364	0.0012	0.0008	37.4284
800	30	0.0574	0.0373	0.0011	0.0008	34.9051
800	40	0.0627	0.0382	0.0011	0.0009	39.1360

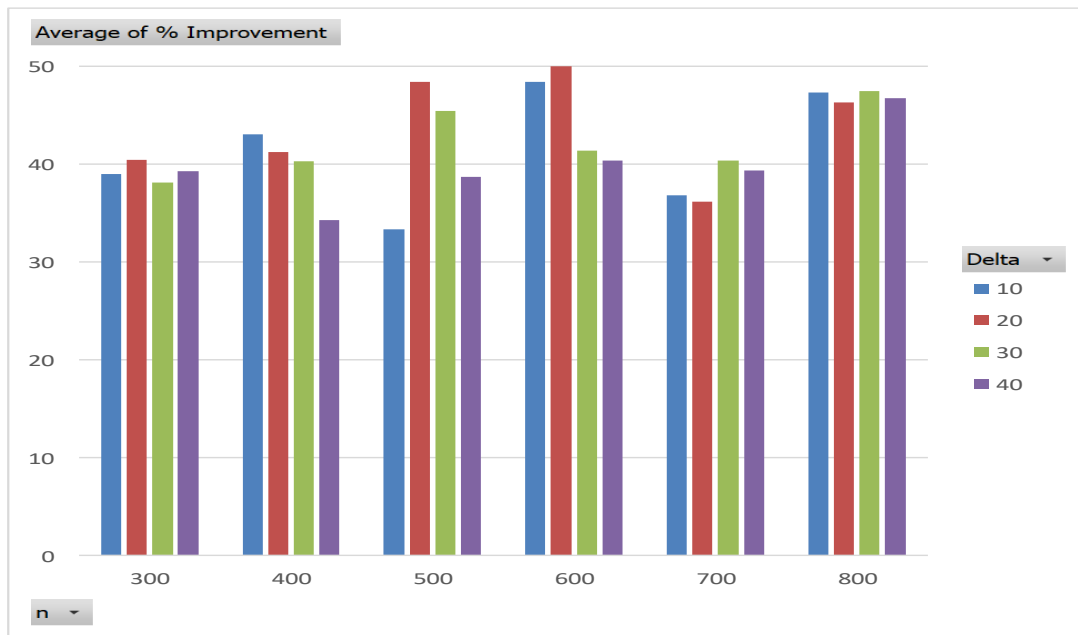


Figure 1. Percentage improvement of NA over OA – Normal Distribution

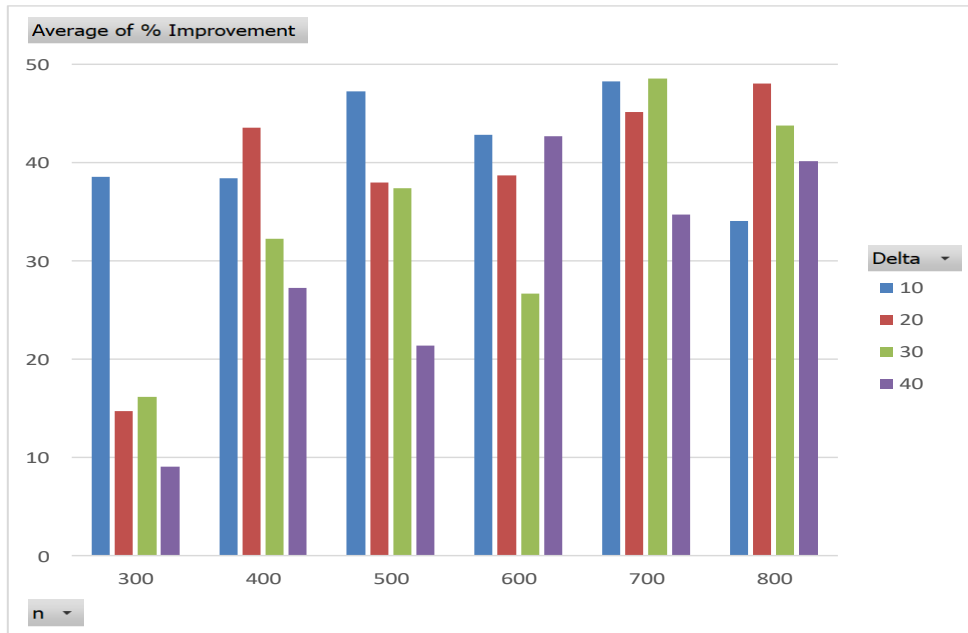


Figure 2. Percentage improvement of NA over OA – Uniform Distribution

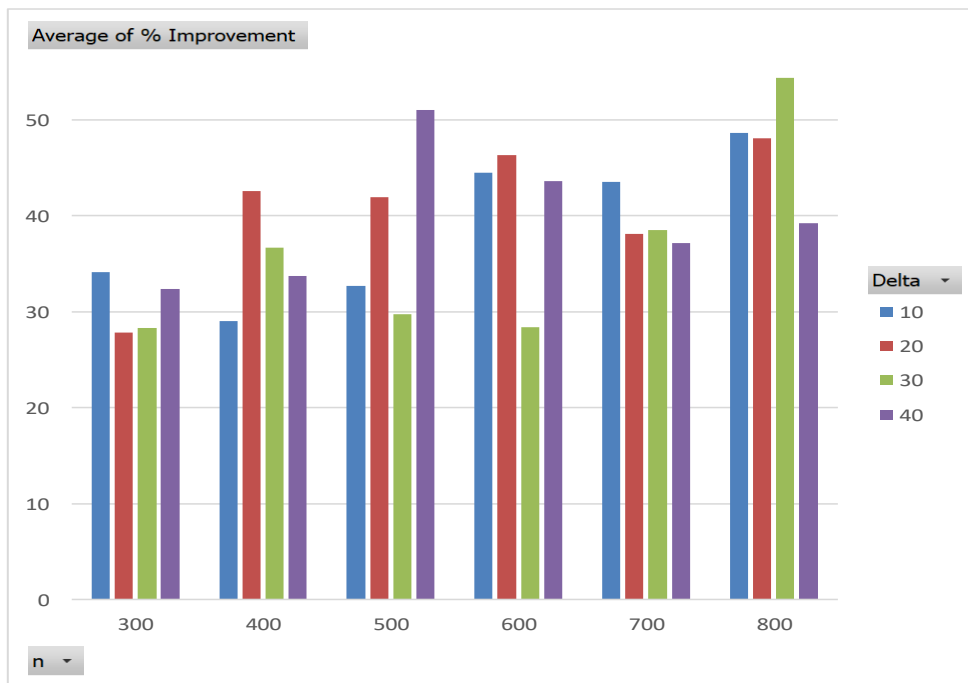


Figure 3. Percentage improvement of NA over OA – Positive Linear Distribution

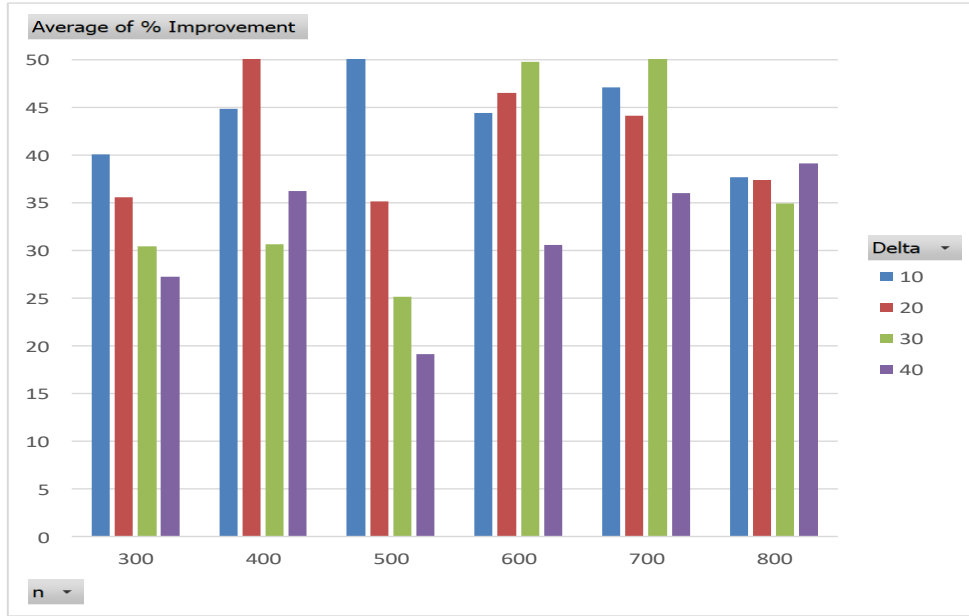


Figure 4. Percentage improvement of NA over OA – Negative Linear Distribution

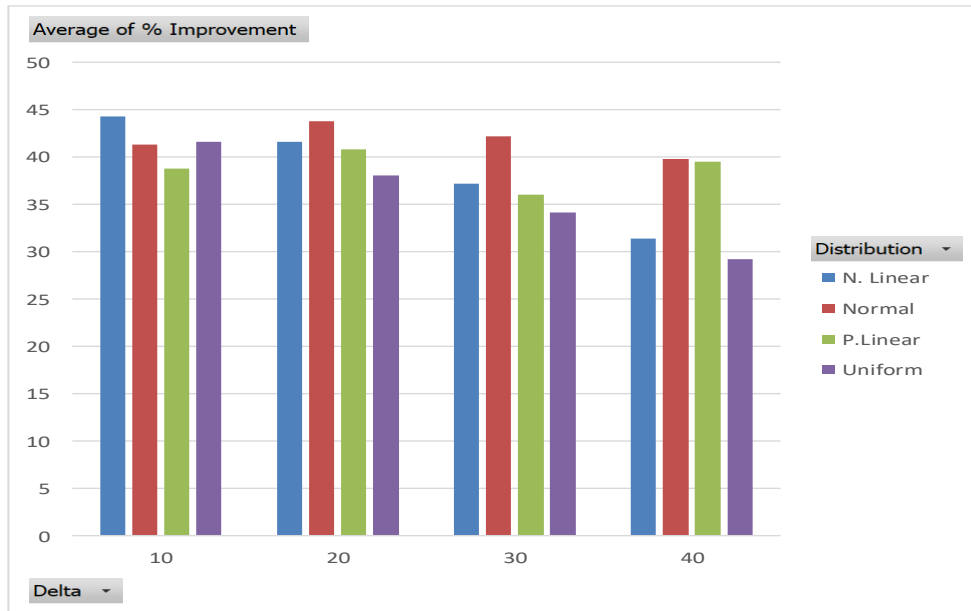


Figure 5. Percentage improvement of NA over OA over Distributions and Delta

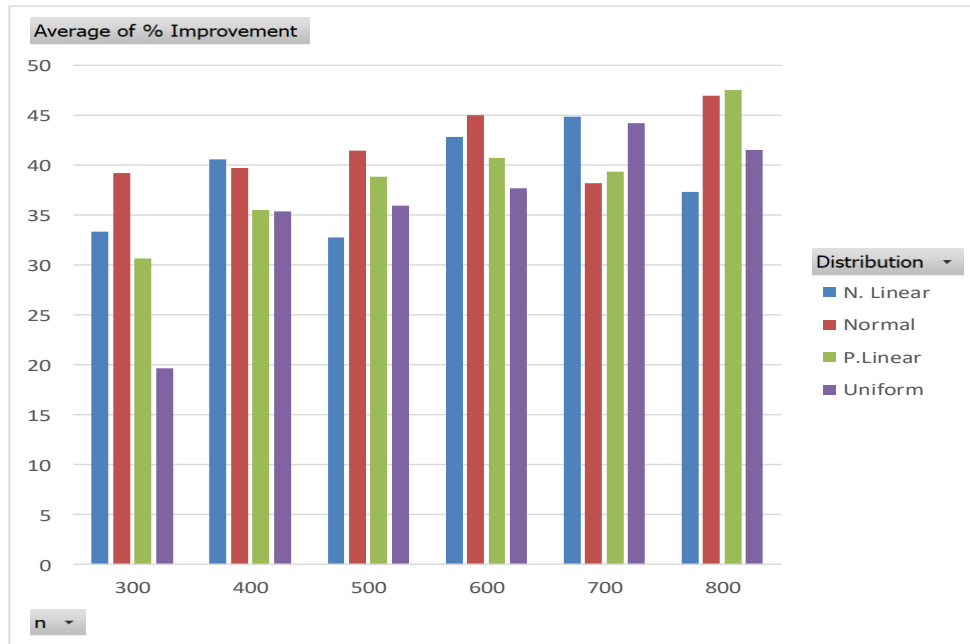


Figure 6. Percentage improvement of NA over OA over Distributions and Number of Jobs

4. Conclusion

The flowshop scheduling problem with four-machine where processing times are uncertain is addressed. The objective is to minimize makespan. This problem was earlier investigated in the scheduling literature and several algorithms were presented. It was shown that the algorithm OA in the literature was the best. In the current paper, we propose a new algorithm (NW). We show that the proposed new algorithm NW significantly reduces the error of the best existing algorithm OA. In other words, the algorithm NW reduces the error of the best existing algorithm OA about 40%. It should be noted that both algorithms OA and NW have the same computational times. This result was statistically verified by conducting test of hypothesis with a significance level of 0.01. Therefore, the newly proposed algorithm NW is recommended.

One of the assumptions made in this paper is that there are no setup times. This may be true for majority of manufacturing systems while it may not be appropriate for some other manufacturing systems. Thus, an extension of the addressed problem is to consider the flowshop scheduling problem with four-machine for minimizing makespan where setup times are separate from processing times and processing times are uncertain. Another extension is to investigate the considered problem with a due date related performance measure such as total tardiness or number of tardy jobs.

References

- Allahverdi, A., 2001. The tricriteria two-machine flowshop scheduling problem. *International Transactions in Operational Research* 8, 403-425.
- Allahverdi, A., 2004. A new heuristic for m-machine flowshop scheduling problem with bicriteria of makespan and maximum tardiness. *Computers & Operations Research* 31, 157-180.
- Allahverdi, A., Allahverdi, M., 2018. Two-machine no-wait flowshop scheduling problem with uncertain setup times to minimize maximum lateness. *Computational and Applied Mathematics* 37, 6774-679.
- Allahverdi, M., Allahverdi, A., 2020. Algorithms for Four-machine flowshop scheduling problem with uncertain processing times to minimize makespan. *RAIRO Operations Research* 54, 529-553.
- Allahverdi, A., Aydilek, H., 2010a. Heuristics for two-machine flowshop scheduling problem to minimize makespan with bounded processing times. *International Journal of Production Research* 48, 6367- 6385.

- Allahverdi, A., and Aydilek, H., 2010b. Heuristics for two-machine flowshop scheduling problem to minimize maximum lateness with bounded processing times. *Computers and Mathematics with Applications* 60, 1374-1384.
- Allahverdi, A., and Sotskov, Y.N., 2003. Two-machine flowshop minimum length scheduling problem with random and bounded processing times. *International Transactions in Operational Research* 10, 65-76.
- Aydilek, H., and Allahverdi, A., 2010. Two-machine flowshop scheduling problem with bounded processing times to minimize total completion time. *Computers and Mathematics with Applications* 59, 684-693.
- Aydilek, A., Aydilek, H., Allahverdi, A., 2013. Increasing the profitability and competitiveness in a production environment with random and bounded setup times. *International Journal of Production Research* 51, 106- 117.
- Aydilek, A., Aydilek, H., Allahverdi, A., 2015. Production in a two-machine flowshop scheduling environment with uncertain processing and setup times to minimize makespan. *International Journal of Production Research* 53, 2803-2819.
- Aydilek, A., Aydilek, H., Allahverdi, A., 2017. Algorithms for minimizing the number of tardy jobs for reducing production cost with uncertain processing times. *Applied Mathematical Modelling* 45, 982-996.
- Dumaine, B., 1989. How managers can succeed through speed. *Fortune* 12, 54-59.
- Fuchigami, H.Y., Rangel, S., 2018. A survey of case studies in production scheduling: Analysis and perspectives. *Journal of Computational Science* 25, 425-436.
- Garey, M.R., Johnson, D.S., Sethi, R., 1976. The complexity of flowshop and jobshop scheduling. *Mathematics of Operations Research* 1, 117-129.
- Gonzalez-Neira, E.M., Ferone, D., Hatami, S., Juan, A.A. 2017. A biased-randomized simheuristic for the distributed assembly permutation flowshop problem with stochastic processing times. *Simulation Modelling Practice and Theory* 79, 23-36.
- Kouvelis, P., Yu, G. 1997. *Robust Discrete Optimization and its Applications*, Kluwer Academic Publisher.
- Mahjoub, A., Sanchez, J. E. P. 2011. Trystram, D. Scheduling with uncertainties on new computing platforms. *Computational Optimization and Applications* 48, 369-398.
- Sotskov, Y.N., Allahverdi, A., Lai, T.C., 2004. Flow shop scheduling problem to minimize total completion time with random and bounded processing times. *Journal of Operational Research Society* 55, 277-286.
- Stefansson, H., Sigmarsdottir, S., Jensson, P., Shah, N., 2011. Discrete and continuous time representations and mathematical models for large productions scheduling problems: a case study from the pharmaceutical industry. *European Journal of Operational Research* 215, 383-392.



Optimization of Fuel Cost in Electric Power Systems using Harmony Search Algorithm

Ayşe Erdoğan Yıldırım¹ 

¹Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Firat University, 23119, Elazığ, TURKEY

Başvuru/Received: 21/10/2020

Kabul / Accepted: 27/03/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 23/05/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Abstract

Fuel Cost Optimization emerges as an important issue in electrical load distribution systems. In this study, the performance of Harmony Search Algorithm, which has a significant place in the literature, has been observed for sample problems in the field of fuel cost optimization. It is aimed to distribute the load provided by 3-unit, 13-unit and 40-unit power plants with minimum cost. Economic load dispatch problem emerges as a multi-objective optimization problem. For this reason, equal weighted scalarization method has been used. Transmission line losses are taken into account in the solution of unit-3 and unit-13 test systems. For this purpose, Kron's transmission line loss formula are used. In the solution of the unit-40 test system, transmission line loss is ignored. The results obtained are presented in comparison with various mathematical, evolutionary and heuristic/meta-heuristic algorithms used in the literature to solve the same problems. The results show that the Harmony Search Algorithm is a successful algorithm for fuel cost optimization in electric load dispatch systems.

Key Words

“Multi-objective optimization, Harmony search algorithm, Fuel cost optimization, Electric power systems, Power distribution systems, Economic load dispatch”

1. Introduction

Reducing energy production cost is an important issue that can provide great savings in all areas. With the increase of the population and the industrial establishments using energy resources, the energy need is increasing day by day. To provide this need for energy, power plants are expanding, and energy systems are becoming more complex. The use of biofuels such as coal, lignite, and fuel oil in thermal power plants, which account for a significant portion of electricity generation, raises fuel costs and, as a result, production costs. In thermal power plants, as in all fields, lowering energy production costs is critical. In order to save energy, dynamic load management systems in thermal power plants use load estimates obtained from feedback systems. Thus, it aims to develop optimum generator outputs. For these power plants, the fuel cost is calculated by the 2nd order equations that depend on the output power. Optimization algorithms are used in these systems to keep the output power and total cost to a minimum. Because the economic load dispatch problems are discrete optimization problems including nonlinear equations, these problems are difficult to solve with mathematical methods. For this reason, meta-heuristic optimization algorithms that provide fast, easy to apply and effective solutions are preferred instead of classical optimization methods (Chowdhury and Rahman, 1990; Song et al, 1999; Kök and Yalçınöz, 2005; Öztürk et al, 2011; Mohamed, 2017).

Harmony Search Algorithm has an important place among meta-heuristic algorithms as it can exchange candidate solutions between convergent and divergent regions. In this way, the chances of reaching the global optimum without getting stuck at the local optimum are higher than most current optimization methods. Harmony Search Algorithm is reputable among meta-heuristic optimization algorithms with clarity and simplicity in application, having few design parameters, work fast thanks to random operators and its success in achieving optimum. Due to its success in solving many complex problems such as university schedule, congestion management, job shop scheduling, clustering, structural design, renewable energy, water distribution and data mining, it has been preferred for economic load distribution optimization, which is the focus of this article (Abualigah et al, 2020).

In recent years, the heuristic methods that offer fast, practical and effective solutions as an alternative to mathematical methods are mostly used in studies to provide fuel cost optimization in electric power systems. Ross and Kim (1980) proposed the dynamic programming successive approximations (DPSA) algorithm for dynamic economic load distribution with their work. By applying DPSA to two different systems, they have achieved economic load dispatch in the systems with partially more units. Irving and Sterling (1983) created a fast and low memory requirement system with an algorithm developed using the dual revised Simplex method in order to optimize large-scale and dynamic power systems. Yang et al. (1996) have developed an algorithm based on evolutionary programming for electric power dispatch systems with non-linear function. They applied their method to two sample problems and compared the results with dynamic programming, simulated annealing, and genetic algorithms. They also observed the performance of the proposed method for Taipower system. Song et al. (1999) investigated the effectiveness of the Artificial Ant Colony Algorithm for a real system containing up to 40 units of data. Yalçınöz et al. (2002) solved the economic load distribution problem by using Tabu Search Algorithm in test system with 6 generators. Sinha et al. (2003) et al. tested the performance of evolutionary algorithms in the field of economic load distribution. Firstly, they proposed improvement in the basic method based on scaled cost. Secondly, it measured the performance of evolutionary algorithms for problems with non-convex cost curves where gradient-based methods cannot be used. Ah King and Rughooputh (2003) used the Elitist Multi-Objective Evolutionary Algorithm for both environmental friendly and economical load distribution in their studies. Brini et al. (2009) examined the problem of fuel cost optimization for system consisting of thermal energy and wind power plants and tested the IEEE network (30 nodes, 8 machines and 41 lines) using Strength Pareto Evolutionary Algorithm. Tosun et al. (2009) studied on the fuel cost optimization using the method of Simulated Annealing. Duman et al. (2010) presented their solutions, which they obtained using three heuristic algorithms as Genetic Algorithm, Simulated Annealing and Tabu Search Algorithm in comparison for 6 thermal power plants in Turkey. Öztürk et al. (2011) realized the application of economic load distribution for the system with 3 thermal power plants using Genetic Algorithm. Adaryani and Karami (2013) solved and tested multi-objective optimal power flow problem with the IEEE 9-bus system, IEEE 30-bus system and IEEE 57-bus system using Artificial Bee Colony Algorithm. Xiong et al. (2013) applied a multi-strategy ensemble biogeography-based optimization (MsEBBO) algorithm to the load distribution systems including 13, 15, 38 and 40 generators. Sahoo et al. (2015) comparatively analyzed the optimum load distribution applications solved using evolutionary algorithms. Aliyari et al. (2017) proposed a new approach that combines Particle Swarm Optimization with Genetic Algorithm. They evaluated the results by applying their work on 13-unit and 40-unit test systems by without considering the transmission line loss. In their study, Tefek et al. (2018) applied meta-heuristic methods such as Particle Swarm Optimization (PSO), Artificial Bee Colony (ABC), Teaching Learning Based Optimization (TLBO) and Gravitational Search Algorithm (GSA) to 3-unit and 13-unit generation systems with valve point load. They evaluated the performance of these algorithms in the economic load dispatch problem. Li et al. (2019) have proposed a multi-population Differential Evolution Algorithm for the economic load distribution problem and solved the problem in different ways by taking and without considering the transmission line loss for 13-unit, 40-unit, 80-unit and 140-unit test systems. Fu et al. (2020) used an Improved Bird Swarm Algorithm (IBSA) for the economic load distribution problem. They applied the algorithm for 6-unit and 15-unit test systems by considering transmission line loss.

In this study, Harmony Search Algorithm, which is a music based meta-heuristic method, is used to optimize the fuel cost utilized during load distribution of electric power plants. In Chapter 2, Harmony Search Algorithm is introduced in detail and the algorithm steps, operators (HMCR, PAR, RS) and flow diagram are given. In Chapter 3, the information is given about the fuel cost optimization problem in electric power systems and the problem and constraints to be used in this study are presented. In Chapter 4, the solution of

fuel cost optimization problem is implemented by Harmony Search Algorithm. The experimental results for Harmony Search Algorithm are given in Chapter 5. It is compared with the solutions of Lagrange and Artificial Bee Colony Algorithm. In the Conclusion part, the results obtained are interpreted.

2. Harmony Search Algorithm

Harmony Search Algorithm has been proposed by Geem et al.(2001). It is a meta-heuristic algorithm based population that models the effort of catching harmony among the sounds of musical instruments. The pitch of a musical instrument determines its harmony quality. Similarly, for an optimization problem, the fitness function determines the importance of decision variables. If the musician gets good harmony, she/he will record it in her/his memory. Likewise, if the algorithm achieves better fitness value, it stores this value in harmony memory. Using these similarities, Harmony Search Algorithm has been designed for optimization problems. Due to its random-based operators, Harmony Search Algorithm is an intuitive method that is fast to operate and easy to design (Geem et al., 2001; Geem, 2009; Mahdavi et al., 2007; Alia and Mandava, 2011).

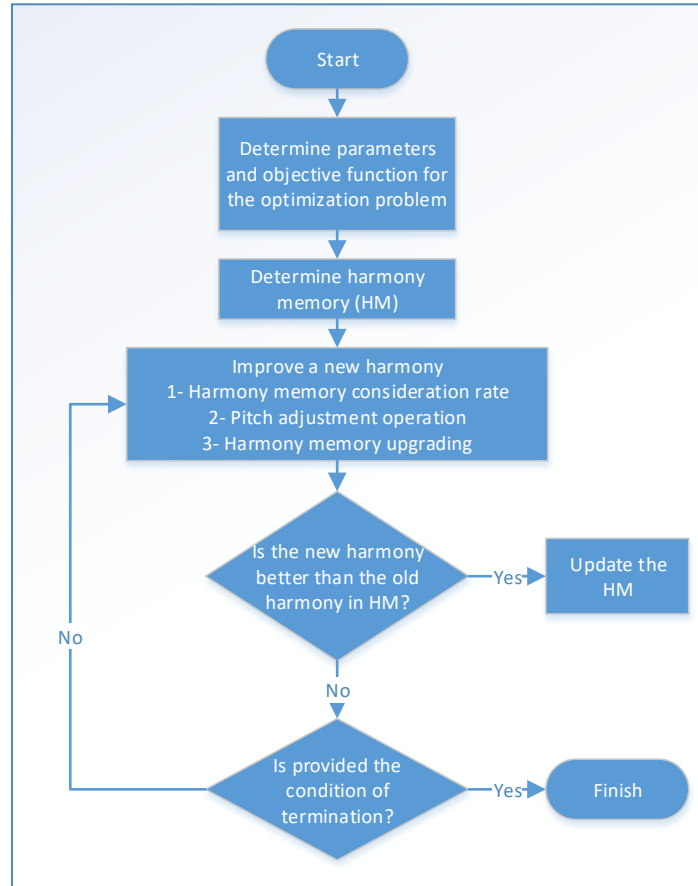


Fig 1. The flowchart of Harmony Search Algorithm

In Fig. 1, the flow diagram of Harmony Search algorithm is given. As shown in the figure, the algorithm starts with the creation of the parameters and the harmony memory (HM) according to the problem parameters (Alia and Mandava, 2011). The HM is initially filled with random values that are compatible the parameter boundaries. At the same time, the objective function appropriate for the problem is determined. At this stage, if it is a constrained optimization problem, a method is chosen related to how the constraint function will be effected on the objective function. Then, a new harmony is generated in three ways. These ways are harmony memory consideration rate (HMCR), pitch adjustment rate (PAR) and random selection. If the obtained new harmony is better than anyone in HM, the new harmony is stored instead of the worst harmony in HM. Unless the termination conditions are met, the process of creating new harmony and if necessary, the process of updating the HM is repeated (Fesanghary, 2010; Ceylan and Ceylan, 2013).

2.1. Harmony Memory Consideration Rate (HMCR)

In the applications of Harmony Search Algorithm, the new harmony is determined using three different methods. The first of these is the method of HMCR. HMCR is the process of selecting from existing values in the HM for the new harmony. Accordingly, while the new harmony (x'_i) is randomly chosen from the HM ($x_i^1, x_i^2, x_i^3, \dots, x_i^{HMS}$) with the HMCR probability, the new harmony (x'_i) is randomly selected from the solution space (X_i) with (1-HMCR) probability (Gao et al., 2015; Lee and Geem, 2004).

$$x'_i = \begin{cases} \text{HMCR probability} & x'_i \in \{x_i^1, x_i^2, x_i^3, \dots, x_i^{HMS}\} \\ (1 - \text{HMCR}) \text{ probability} & x'_i \in X_i \end{cases} \quad (1)$$

The construction of the selection process is shown in Equation 1.

2.2. Pitch Adjustment Rate (PAR)

Another method used to determine new harmony is Pitch Adjustment Rate (PAR). With the process of PAR, $\pm \text{rand}(0,1) \times bw$ is added to randomly selected harmonies from the existing HM in the probability of PAR. In the case of (1-PAR), HM is not changed.

$$x'_i = \begin{cases} \text{PAR probability} & x'_i \pm \text{rand}(0,1) \times bw \\ (1 - \text{PAR}) \text{ probability} & x'_i \end{cases} \quad (2)$$

Pitch Adjusting is performed according to Equation 2. Here, $\text{rand}(0,1)$ shows the randomly generated value between 0 and 1. bw also indicates the bandwidth value calculated in accordance with the algorithm (Lee and Geem, 2004).

2.3. Random Selection (RS)

If the condition of HMCR is not provided, the random selection process is applied (Gao et al., 2015; Lee and Geem, 2004). The new harmony vector is generated randomly as Equation 3:

$$x'_{ij} = l_{ij} + (u_{ij} - l_{ij}) \times \text{rand}(0,1) \quad (3)$$

Where l is the lower bound and u is the upper bound for the parameter of the given problem. And, $\text{rand}(0,1)$ shows the randomly generated value between 0 and 1.

3. The Fuel Cost Optimization Problem in Power Systems

In power distribution systems, the power requested by the customers are different magnitude. Since, it is not possible to change the location of plant according to the unit fuel cost (\$/MW), in order to minimize the line losses on the system, the system must be fed by evaluating the fuel cost of the power plant (Rahman et al., 2006).

The fuel cost of each producing thermal power plant is calculated according to Eq. 4.

$$F_i = c_i + b_i P_i + a_i P_i^2 \quad (4)$$

Total fuel cost for all thermal power plants is calculated by Eq. 5-7.

$$F_T = F_1 + F_2 + \dots + F_K = \sum_{i=1}^n F_i \quad (5)$$

$$F_T = \sum_{i=1}^n (c_i + b_i P_i + a_i P_i^2) \quad (6)$$

$$F_T = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) \quad (7)$$

For economic load distribution problem, load capacities should be limited. Moreover, in economic load distribution problems, fuel cost functions are usually expressed as a quadratic equation (Yalcinoz and Altun, 2001; Altun and Yalcinoz, 2008).

Eq. 11 gives the load balance in electrical power systems.

$$\sum_{i=1}^n P_i - P_L = P_D \quad (11)$$

Here, P_L indicates line loss. P_D shows load demand. In addition, Eq. 12 is used as constraint function.

$$\sum_{i=1}^n P_i - P_L - P_D = 0 \quad (12)$$

3.1. 3-Unit Test System

In the first application, fuel cost was calculated for three different thermal power plants using different fuel types. The coefficients and limits used for this purpose are given in Table 1.

Table 1. Fuel cost coefficients and limits for the 3 thermal units system

Generators	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	a_i (\$/(MW) ²)	b_i (\$/MW)	c_i (\$)
P _{G1}	150	600	0.00142	7.2	510
P _{G2}	100	400	0.00194	7.85	310
P _{G3}	50	200	0.00482	7.97	78

For this application, line loss is taken into account for 3-unit test system. The line loss function is given in Eq. 13.

$$P_L = 0.00003P_1^2 + 0.00009P_2^2 + 0.00012P_3^2 \tag{13}$$

In addition, load demand (P_D) is 850.

In this part, the data for the economic load distribution problem is as above. Here, it is aimed to minimize the fuel cost functions for three different thermal power plants by taking the constraint conditions into account (Öztürk et al., 2011).

3.2. 13-Unit Test System

In the second application, fuel cost was calculated for thirteen different thermal power plants. The coefficients and limits used for the 13-unit test system are given in Table 2 (Aliyari et al., 2017).

Table 2. Fuel cost coefficients and limits for the 13 thermal units system

Generators	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	a_i (\$/(MW) ²)	b_i (\$/MW)	c_i (\$)
P _{G1}	0	680	0.00028	8.10	550
P _{G2}	0	360	0.00056	8.10	309
P _{G3}	0	360	0.00056	8.10	307
P _{G4}	60	180	0.00324	7.74	240
P _{G5}	60	180	0.00324	7.74	240
P _{G6}	60	180	0.00324	7.74	240
P _{G7}	60	180	0.00324	7.74	240
P _{G8}	60	180	0.00324	7.74	240
P _{G9}	60	180	0.00324	7.74	240
P _{G10}	40	120	0.00284	8.6	126
P _{G11}	40	120	0.00284	8.6	126
P _{G12}	55	120	0.00284	8.6	126
P _{G13}	55	120	0.00284	8.6	126

For this application, load demand (P_D) is 2520. In addition, line loss is taken into account for 13-unit test system. For this purpose, the B loss coefficients is used. The $B_{i,j}$ loss coefficient matrix, the $B_{0,j}$ loss coefficient vector and the $B_{0,0}$ loss constant are given in Appendix-1 (Li et al, 2019). The formula of transmission line loss is expressed as in Eq. 14.

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^N B_{i0} P_i + B_{00} \tag{14}$$

This formula is also known as Kron's transmission line loss account (Wood and Wollenberg, 2006).

3.3. 40-Unit Test System

In the third application, fuel cost was calculated for forty different thermal power plants. The coefficients and limits used for the 40-unit test system are given in Table 3 (Aliyari et al., 2017).

Table 3. Fuel cost coefficients and limits for the 40 thermal units system

Generator	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	a_i (\$/(MW) ²)	b_i (\$/MW)	c_i (\$)	Generator	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	a_i (\$/(MW) ²)	b_i (\$/MW)	c_i (\$)
P _{G1}	36	114	0.0069	6.73	94.705	P _{G21}	254	550	0.00298	6.63	785.96
P _{G2}	36	114	0.0069	6.73	94.705	P _{G22}	254	550	0.00298	6.63	785.96
P _{G3}	60	120	0.02028	7.07	309.54	P _{G23}	254	550	0.00284	6.66	794.53
P _{G4}	80	190	0.00942	8.18	369.03	P _{G24}	254	550	0.00284	6.66	794.53
P _{G5}	47	97	0.0114	5.35	148.89	P _{G25}	254	550	0.00277	7.1	801.32

Table 3 (cont). Fuel cost coefficients and limits for the 40 thermal units system

Generator	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	a_i (\$/(MW) ²)	b_i (\$/MW)	c_i (\$)	Generator	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	a_i (\$/(MW) ²)	b_i (\$/MW)	c_i (\$)
P _{G6}	68	140	0.01142	8.05	222.33	P _{G26}	254	550	0.00277	7.1	801.32
P _{G7}	110	300	0.00357	8.03	287.71	P _{G27}	10	150	0.52124	3.33	1055.1
P _{G8}	135	300	0.00492	6.99	391.98	P _{G28}	10	150	0.52124	3.33	1055.1
P _{G9}	135	300	0.00573	6.6	455.76	P _{G29}	10	150	0.52124	3.33	1055.1
P _{G10}	130	300	0.00605	12.9	722.82	P _{G30}	47	97	0.0114	5.35	148.89
P _{G11}	94	375	0.00515	12.9	635.2	P _{G31}	60	190	0.0016	6.43	222.92
P _{G12}	94	375	0.00569	12.8	654.69	P _{G32}	60	190	0.0016	6.43	222.92
P _{G13}	125	500	0.00421	12.5	913.4	P _{G33}	60	190	0.0016	6.43	222.92
P _{G14}	125	500	0.00752	8.84	1760.4	P _{G34}	90	200	0.0001	8.95	107.87
P _{G15}	125	500	0.00708	9.15	1728.3	P _{G35}	90	200	0.0001	8.62	116.58
P _{G16}	125	500	0.00708	9.15	1728.3	P _{G36}	90	200	0.0001	8.62	116.58
P _{G17}	220	500	0.00313	7.97	647.85	P _{G37}	25	110	0.0161	5.88	307.45
P _{G18}	220	500	0.00313	7.95	649.69	P _{G38}	25	110	0.0161	5.88	307.45
P _{G19}	242	550	0.00313	7.97	647.83	P _{G39}	25	110	0.0161	5.88	307.45
P _{G20}	242	550	0.00313	7.97	647.81	P _{G40}	242	550	0.00313	7.97	647.83

For this application, load demand (P_D) is 10500. In addition, line loss is neglected for 40-unit test system.

4. The Implementation of Harmony Search Algorithm on Fuel Cost Optimization Problems

The objective function for fuel cost optimization with Harmony Search Algorithm was determined as the sum of the fuel cost functions calculated for thermal power plants (Eq. 15)

$$F_T = F_1 + F_2 + \dots + F_K = \sum_{i=1}^n F_i \tag{15}$$

In this study, static penalty approach was used to handle constraints. With this approach, a fixed penalty was imposed on the objective function when the constraint was violated. For this problems, the constraint function $g(x)$ has been given in Eq. 16.

$$g(x) = P_D + P_L - [\sum_{i=1}^n P_i] \tag{16}$$

Accordingly, with the static penalty approach (Smith and Coit, 1997), the constraint function had been imposed on the objective function.

Table 4 shows the parameter settings of Harmony Search Algorithm for the fuel cost optimization problems in detail.

Table 4. Harmony search parameter settings for fuel cost optimization problems

Parameter	Value (Unit-3)	Value (Unit-13)	Value (Unit-40)
Number of variables	3	13	40
Number of constraints	1	1	1
Max Iteration	10000	10000	50000
HMS (Harmony Memory Size)	6	100	50
HMCR (Harmony Memory Consideration Rate)	0.9	0.95	0.95
Min PAR	0.4	0.3	0.3
Max PAR	0.9	0.95	0.95
Min bandwidth	0.0001	0.0001	0.0001
Max bandwidth	1.0	1.0	1.0

After the parameters, objective function and penalty function were determined, the harmony memory (HM) was randomly generated in accordance with the range of variables. Then, fitness function and penalty function were calculated.

The harmony search approach had continued with the new harmony creation step. For this purpose, one of the memory consideration, pitch adjusting and random selection methods had been used. Which method to use was determined by creating two random values between 0 and 1 called x and y . Accordingly, the following algorithm was applied.

```

if  $x < HMCR$ 
    Apply Memory Consideration
        If  $y < PAR$ 
            Apply Pitch Adjusting
        end
else if  $x > HMCR$ 
    Apply Random Selection
end
    
```

While applying the step of *Memory Consideration*, the value in an index randomly determined from the HM was taken into the new harmony. In the step of *Pitch Adjusting*, firstly, a random value was generated in the interval [0,1] called p . Then, a constant value (bw) was generated using the bandwidth, current iteration and max iteration values. If $p < 0.5$, the value of $rand(1) * bw$ was added to the old value in HM. Otherwise, the value of $rand(1) * bw$ was subtracted from the old value. It was checked whether the obtained value was within the parameter limits. If it was within the limits, the value was added to the new harmony.

```

If  $p < 0.5$ 
     $old = old + rand(1) * bw$ 
else
     $old = old - rand(1) * bw$ 
    
```

While applying the step of *Random Selection*, a random value was chosen within the parameter boundaries and included in the new harmony.

According to the algorithm, after the new harmony and its fitness value were calculated, the best and worst fitness values were determined. The new harmony value was first compared with the best fitness value in HM. If the new harmony is better than the best value in HM, it is added to HM, while the worst value is subtracted from HM. Depending on the changes made, it has been updated best and worst values. If the new harmony is not better than the best value, but better than the worst value, it is still added to the HM. This time, only the worst value was modified. If the new harmony is worse than the worst value in HM, it is not taken into HM. The process of creating new harmony continued until the specified maximum number of iterations.

5. Experimental Results

Fuel cost optimization with Harmony Search Algorithm was encoded on an Intel Core-i5 2.5 GHz Turbo 3.1 GHz PC using MATLAB 2018b. The application of the economic load dispatch problems with the Harmony Search Algorithm shows the results obtained with 30 independent runs for each system.

5.1. 3-Unit Test System

Firstly, Harmony Search Algorithm has been tested on 3 thermal power plants having limited power capacity and having three different fuel types in order to minimize the fuel cost in electric power distribution systems. In Table 5, it is seen the change of fuel cost optimization results (the power of the thermal plants, power loss, best fitness value and computational time) with Harmony Search Algorithm in terms of the number of iteration.

Table 5. The change of fuel cost optimization results according to the number of iterations

Iteration number	P ₁ (MW)	P ₂ (MW)	P ₃ (MW)	(P _L) (MW)	Best Fitness (F _T) \$/h	Computational Time (sec.)
1000	490.7358	260.6997	113.4505	14.8860	7.9178e+03	0.068
2000	520.6509	245.6365	98.4380	14.7255	7.9082e+03	0.090
3000	524.0522	238.1083	102.4403	14.6008	7.9073e+03	0.127
4000	553.5062	202.4371	108.3447	14.2880	7.9070e+03	0.152
5000	547.7023	220.5247	96.2611	14.4881	7.9048e+03	0.156
8000	550.8535	218.3180	95.3114	14.4829	7.9047e+03	0.210
10000	545.1810	221.9300	97.3760	14.4820	7.9047e+03	0.256

The success of Harmony Search Algorithm in the implementation of fuel cost optimization for electric power distribution system was compared with the Lagrange Multipliers and Artificial Bee Colony Algorithm.

Table 6. Comparative results for 3-unit test system

Algorithm & Method	P ₁ (MW)	P ₂ (MW)	P ₃ (MW)	Best Fitness (F _T) \$/h	P _L (MW)	Constraint Function Value
Lagrange Multipliers	435.1	299.9	130.7	7952	15.82	0.1239
Artificial Bee Colony (ABC)	548.764	222.149	93.410	7904	14.38	0.1998
Harmony Search (HS)	545.181	221.930	97.376	7904	14.48	2.8317*10⁻⁴

The comparative results for the method of Lagrange Multipliers, Artificial Bee Colony Algorithm and Harmony Search Algorithm for solving 3-unit test system are given in Table 6. For best fitness value, the amount of power consumed by 3 thermal power plants has been given by P₁, P₂, P₃. In addition, the results in terms of *best fitness*, *transmission line loss* and *constraint function value* are given in Table 6. *Best fitness* shows the best results achieved with 30 runs. P_L indicates the power loss occurring on the line during transmission. On the other hand, *constraint function value* shows the convergence value of the constraint function to zero for the best fitness.

As seen in Table 6, Artificial Bee Colony Algorithm and Harmony Search Algorithm provides advantage in terms of fitness value according to Lagrange Multipliers method (Öztürk et al., 2011). However, it is seen that the method of Lagrange Multipliers and the ABC algorithm inadequate according to the Harmony Search algorithm in terms of compliance with the constraint function (Öztürk et al., 2011). In addition, Harmony Search algorithm works quite fast due to random-based operators.

5.2. 13-Unit Test System

In the second application, the success of the Harmony Search Algorithm is evaluated on the 13-unit test system. Table 7 presents the best result of the Harmony Search Algorithm in 13-unit test system and the best P_i values obtained accordingly. Transmission line loss is also given in the table.

Table 7. Best result obtained by Harmony Search Algorithm for 13-unit test system

Generators	P _{min} (MW)	P _{max} (MW)	P _i (MW)
P _{G1}	0	680	649.09265
P _{G2}	0	360	326.27103
P _{G3}	0	360	179.50858
P _{G4}	60	180	145.70709
P _{G5}	60	180	169.58356
P _{G6}	60	180	172.98691
P _{G7}	60	180	177.78502
P _{G8}	60	180	173.23779
P _{G9}	60	180	177.04062
P _{G10}	40	120	54.40878
P _{G11}	40	120	110.09333
P _{G12}	55	120	115.38593
P _{G13}	55	120	94.39442
Load Demand (MW)			2520
Transmission Loss (MW)			25.32522
Total power output (MW)			2545.32522
Total generation cost (\$/h)			24411.46705

In Table 8, the results of the economic load dispatch problem with Harmony Search approach for 13-unit test system has compared with the results of various heuristic/meta-heuristic and evolutionary methods in the literature. In Table 8, it is seen that Harmony Search Algorithm is superior to other methods in terms of both *total generation cost* and *transmission line loss* (P_{Loss}). In addition, in terms of computational time, it is appears that it is more successful than all of them except BBO and DE / BBO. This methods are seen to have lower performance than Harmony Search Algorithm.

Table 8. Comparative results for 13-unit test system

Algorithm & Method	Best Fitness (F _T) \$/h	P _{Loss} (MW)	Computational Time (sec.)
HDE (Wang et al.,2007)	24591.76	39.1582	3.573
ST-HDE (Cai et al., 2012)	24560.08	44.3314	2.9783
ICA-PSO (Vlachogiannis and Lee, 2010)	24540.06	-	-
BBO (Bhattacharjee et al., 2014)	24515.21	-	0.15
SOS (Secui, 2016)	24515.06	40.4393	13.75
CS (Yang, 2014)	24514.98	-	2.7166
DE/BBO (Bhattacharjee et al., 2014)	24514.97	-	0.11
SDE (Reddy and Vaisakh, 2013)	24514.88	40.43	-
MABC (Secui, 2015)	24514.87	40.4266	117.6
MCSA (Zhao et al.,2018)	24514.87	40.4266	2.56
MSOS (Secui, 2016)	24514.87	40.4266	12.80
MPDE (Li et al, 2019)	24514.87	40.4266	5.0
Harmony Search (HS)	24411.4670	25.32522	0.848711

5.3. 40-Unit Test System

In the third application, the success of the Harmony Search Algorithm is evaluated on the 40-unit test system. Table 9 gives the best result of the Harmony Search Algorithm in 40-unit test system and the best P_i values obtained accordingly. Transmission line loss has been neglected for this application.

Table 9. Best result obtained by Harmony Search Algorithm for 40-unit test system

Generators	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	P_i (MW)	Generators	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	P_i (MW)
P _{G1}	36	114	110.29158	P _{G21}	254	550	526.50392
P _{G2}	36	114	97.99516	P _{G22}	254	550	541.31560
P _{G3}	60	120	118.79055	P _{G23}	254	550	542.05638
P _{G4}	80	190	166.89665	P _{G24}	254	550	540.77378
P _{G5}	47	97	92.92470	P _{G25}	254	550	543.71069
P _{G6}	68	140	133.81623	P _{G26}	254	550	520.56106
P _{G7}	110	300	292.40465	P _{G27}	10	150	15.90187
P _{G8}	135	300	285.36292	P _{G28}	10	150	15.38631
P _{G9}	135	300	283.30370	P _{G29}	10	150	12.76315
P _{G10}	130	300	156.82297	P _{G30}	47	97	85.63556
P _{G11}	94	375	156.12193	P _{G31}	60	190	186.22376
P _{G12}	94	375	130.10710	P _{G32}	60	190	177.40437
P _{G13}	125	500	219.85852	P _{G33}	60	190	189.16958
P _{G14}	125	500	277.20875	P _{G34}	90	200	198.99970
P _{G15}	125	500	292.31890	P _{G35}	90	200	197.88949
P _{G16}	125	500	352.49031	P _{G36}	90	200	180.34113
P _{G17}	220	500	484.61791	P _{G37}	25	110	98.88074
P _{G18}	220	500	492.57398	P _{G38}	25	110	104.53875
P _{G19}	242	550	510.41547	P _{G39}	25	110	109.97914
P _{G20}	242	550	535.99183	P _{G40}	242	550	521.85052
Load Demand (MW)							10500
Total generation cost (\$/h)							120057.573959

In Table 10, the results of the Harmony Search Algorithm for economic load dispatch problem are presented in comparison with many artificial intelligence optimization methods that have been studied on the 40-unit test system in the literature. The results show that the Harmony Search Algorithm is superior to other compared methods in terms of total generation cost. In terms of computational time, it

is seen that Harmony Search Algorithm is more successful than EP-SQP, PSO-SQP, HCASO, FAPSO, UHGA, AAA, FAPSO-NM, ARCGA, CE-SQP, HAAA, MABC, MPDE.

Table 10. Comparative results for 40-unit test system

Algorithm & Method	Best Fitness	Computational Time
	(F _T) \$/h	(sec.)
EP-SQP (Victoire and Jeyakumar, 2004)	122323.97	997.73
PSO-SQP (Victoire and Jeyakumar, 2004)	122094.67	733.97
HCASO (Cai et al., 2012)	121865.63	168.72
FAPSO (Niknam, 2010)	121712.4	87
ST-HDE (Wang et al., 2007)	121698.51	6.92
UHGA (Da-kuo et al., 2008)	121424.48	333.68
AAA (Kumar and Dhillon, 2018)	121421.2	69
DE/BBO (Bhattacharya and Chattopadhyay, 2010)	121420.89	1.23
RCGA (Amjady and Nasiri-Rad, 2009)	121418.72	-
FAPSO-NM (Niknam, 2010)	121418.3	40
ARCGA (Amjady and Nasiri-Rad, 2010)	121410.10	15.67
FA (Niknam, 2010)	121415.05	-
BA (Niknam, 2010)	121414.91	-
CE-SQP (Subathra et al., 2015)	121412.88	137.86
HAAA (Kumar and Dhillon, 2018)	121412.70	20
CBA (Adarsh et al., 2016)	121412.5468	1.55
MABC (Secui, 2015)	121412.5409	115.2
MCSA (Zhao et al., 2018)	121412.5355	3.9948
MPDE (Li et al, 2019)	121412.5355	18.0
Harmony Search (HS)	120057.573959	7.651581

6. Conclusions

Reducing production and distribution costs in electric power systems is of great importance for all areas of life. Currently, heuristic methods are frequently preferred as well as mathematical methods for economic load distribution (Song et al., 1999; Yalçınöz et al., 2002; Ah King and Rughooputh, 2003; Kök and Yalçınöz, 2005; Brini et al., 2009; Tosun et al., 2009; Duman et al., 2010; Öztürk et al., 2011; Adaryani and Karami, 2013; Xiong et al., 2013; Sahoo et al., 2015; Mohamed et al., 2017; Aliyari et al., 2017; Li et al., 2019; Fu et al., 2020). In this work, the solution of three fuel cost optimization problems, which was previously solved with different mathematical and heuristic methods, was realized by using Harmony Search Algorithm. Harmony Search Algorithm has been developed by modeling the idea of obtaining different melodies using the same notes in the memory (Geem et al, 2001; Geem, 2009; Fesanghary, 2010). The algorithm tries to achieve the local optimum with the help of pitch adjusting operator, and the global optimum with the help of the harmony memory consideration and random selection operators (Ceylan and Ceylan, 2013). Harmony Search algorithm is an easy to apply, fast and efficient meta-heuristic method (Lee and Geem, 2004).

In this article, the fuel cost optimization of systems including 3-unit, 13-unit and 40-unit thermal plants with active power constraints was performed using the Harmony Search Algorithm. Equal weighted scalarization was preferred as a multi-objective optimization method, as the load distribution cost optimization means optimization of separate functions for different thermal power plants. In addition, the method of Static Penalty Function was used in order to effect the constraint function on the objective function. For the fuel cost optimization problem using Harmony Search Algorithm, the optimal value was identified the reached best result when the algorithm ran 30 times. The results obtained were compared with several mathematical, evolutionary and heuristic/meta-heuristic methods.

The experimental results indicate that the application performed with Harmony Search Algorithm is superior in compared to the other approaches. In the three applications performed using the Harmony Search Algorithm, it is seen that the proposed method reaches the best fitness value. In other words, it gives the best result compared to other algorithms in terms of total transmission cost. It is also

successful in minimizing transmission line loss, as seen in the 13-unit test system. In addition, the run-time performance is reasonable and it is better than many algorithms compared.

As a result, it has been shown that the Harmony Search Algorithm, which is an intuitive method, is suitable to be used in the field of fuel cost optimization in electric power systems. It is possible to develop and test the algorithm for more complex power plants in future studies.

Appendix-1

$B_{i,j}=10^{-2} *$

0.0014	0.0012	0.0007	-0.0001	-0.0003	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0003	-0.0005	-0.0003	-0.0002	0.0004
0.0012	0.0015	0.0013	0.0000	-0.0005	-0.0002	0.0000	0.0001	-0.0002	-0.0004	-0.0004	0.0000	0.0004
0.0007	0.0013	0.0076	-0.0001	-0.0013	-0.0009	-0.0001	0.0000	-0.0008	-0.0012	-0.0017	0.0000	-0.0026
-0.0001	0.0000	-0.0001	0.0034	-0.0007	-0.0004	0.0011	0.0050	0.0029	0.0032	-0.0011	0.0000	0.0001
-0.0003	-0.0005	-0.0013	-0.0007	0.0090	0.0014	-0.0003	-0.0012	-0.0010	-0.0013	0.0007	-0.0002	-0.0002
-0.0001	-0.0002	-0.0009	-0.0004	0.0014	0.0016	0.0000	-0.0006	-0.0005	-0.0008	0.0011	-0.0001	-0.0002
-0.0001	0.0000	-0.0001	0.0011	-0.0003	0.0000	0.0015	0.0017	0.0015	0.0009	-0.0005	0.0007	0.0000
-0.0001	0.0001	0.0000	0.0050	-0.0012	-0.0006	0.0017	0.0168	0.0082	0.0079	-0.0023	-0.0036	0.0001
-0.0003	-0.0002	-0.0008	0.0029	-0.0010	-0.0005	0.0015	0.0082	0.0129	0.0116	-0.0021	-0.0025	0.0007
-0.0005	-0.0004	-0.0012	0.0032	-0.0013	-0.0008	0.0009	0.0079	0.0116	0.0200	-0.0027	-0.0034	0.0009
-0.0003	-0.0004	-0.0017	-0.0011	0.0007	0.0011	-0.0005	-0.0023	-0.0021	-0.0027	0.0140	0.0001	0.0004
-0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0002	-0.0001	0.0007	-0.0036	-0.0025	-0.0034	0.0001	0.0054	-0.0001
0.0004	0.0004	-0.0026	0.0001	-0.0002	-0.0002	0.0000	0.0001	0.0007	0.0009	0.0004	-0.0001	0.0103

$B_{0,j} = [-0.0001 \ -0.0002 \ 0.0028 \ -0.0001 \ 0.0001 \ -0.0003 \ -0.0002 \ -0.0002 \ 0.0006 \ 0.0039 \ -0.0017 \ 0.0000 \ -0.0032]$

$B_{0,0} = 0.55$

References

Abualigah, L., Diabat, A. & Geem, Z. W. (2020), A comprehensive survey of the harmony search algorithm in clustering applications. *Appl. Sci.*, 10(11), 3827.

Adarsh, B. R., Raghunathan, T., Jayabarathi, T., & Yang, X.-S. (2016) Economic dispatch using chaotic bat algorithm. *Energy*, 96, 666–675.

Adaryani, M. R., & Karami, A. (2013). Artificial bee colony algorithm for solving multi-objective optimal power flow problem. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 53 (Dec 2013), 219-230.

Ah King, T.F.R., & Rughooputh, C.S.H. (2003). Elitist multiobjective evolutionary algorithm for environmental/economic dispatch. 2003 Congress on Evolutionary Computation (CEC '03), 8-12 Dec 2003, Canberra, Australia, 1108-1114.

Alia, O. M., & Mandava, R. (2011). The variants of the harmony search algorithm: An overview. *Artificial Intelligence Review*, 36(1), 49-68.

Aliyari, H., Effatnejad, R., İzadi, M., & Hosseinian, S.H. (2017). Economic dispatch with particle swarm optimization for large scale system with non-smooth cost functions combine with genetic algorithm. *Journal of Applied Science and Engineering*, 20(2), 141-148.

Altun, H., & Yalcinoz, T. (2008). Implementing soft computing techniques to solve economic dispatch problem in power systems. *Expert Systems with Applications*, 35, 1668–1678.

Amjady N., & Nasiri-Rad, H. (2009). Economic dispatch using an efficient realcoded genetic algorithm. *IET Gener., Transmiss. Distrib.*, 3(3), 266–278.

Amjady, N., & Nasiri-Rad, H. (2010). Solution of nonconvex and nonsmooth economic dispatch by a new Adaptive Real Coded Genetic Algorithm. *Expert Syst. Appl.*, 37(7), 5239–5245.

Bhattacharya, A., & Chattopadhyay, P. K. (2010). Hybrid differential evolution with biogeography-based optimization for solution of economic load dispatch. *IEEE Trans. Power Syst*, 25(4), 1955–1964.

- Bhattacharjee, K., Bhattacharya, A., & Dey, S. H. N. (2014). Oppositional Real Coded Chemical Reaction Optimization for different economic dispatch problems. *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, 55, 378–391.
- Brini, S., Abdallah, H.H., & Ouali, A. (2009). Economic dispatch for power system included wind and solar thermal energy. *Leonardo Journal of Sciences*, 14 (Jan-Jun 2009), 204-220.
- Cai, J., Li, Q., Li, L., Peng, H., & Yang, Y. (2012). A hybrid FCASO-SQP method for solving the economic dispatch problems with valve-point effects. *Energy*, 8(1), 346–353.
- Ceylan, H., & Ceylan, H. (2013). Şehir içi karayolu ağlarının sezgisel harmoni araştırması optimizasyon yöntemi ile ayrık tasarımı (in Turkish). *IMO Teknik Dergi*, 2013, 6211-6231.
- Chowdhury, B.H. & Rahman, S. (1990). A review of recent advances in economic dispatch. *IEEE Transactions on Power Systems*, 5(4), 1248-1259.
- Da-kuo, H., Fu-li, W., & Zhi-Zhong, M. (2008). Hybrid genetic algorithm for economic dispatch with valve-point effect. *Electr. Power Syst. Res.*, 78(4), 626–633.
- Duman, S., Döşoğlu, M. K., Öztürk, A., & Erdoğan, P. (2010). Türkiye’deki güç sisteminde tavlama benzetimi, genetik algoritma ve tabu araştırma algoritmaları kullanılarak ekonomik dağıtım (in Turkish). *Engineering Sciences*, 5(1), 64-78.
- Fesanghary, M. (2010). Harmony Search Algorithm. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/28850-harmony-search-algorithm>, MATLAB Central File Exchange. Retrieved January 28, 2021.
- Fu, C., Zhang, S., & Chao, K-H. (2020). Energy management of a power system for economic load dispatch using the artificial intelligent algorithm. *Electronics*, 9(1), 108 (1-19).
- Gao, X. Z., Govindasamy, V., Xu, H., Wang, X., & Zenger, K. (2015). Harmony search method: Theory and applications. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2015, 1-10.
- Geem, Z. W., Kim, J. H., & Loganathan, G. V. (2001). A new heuristic optimization algorithm: Harmony search, *SIMULATION: Transactions of The Society for Modeling and Simulation*, 76(2), 60-68.
- Geem Z. W. (2009). Music-inspired harmony search algorithm. Berlin, Germany: Springer.
- Irving, M.R. & Sterling, M.J.H. (1983). Economic dispatch of active power with constraint relaxation, *IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution*, 130(4), 172-177.
- Kök, A., & Yalçınöz, T. (2005). Açık artırmalı ekonomik yük dağıtım için yeni bir yaklaşım (in Turkish). I. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, 17-18 May 2005, Kocaeli, Turkey, 71-75.
- Kumar, M., & Dhillon, J. S. (2018). Hybrid artificial algae algorithm for economic load dispatch. *Appl. Soft Comput.*, 71, 89–109.
- Lee, K. S., & Geem, Z. W. (2004). A new structural optimization method based on the harmony search algorithm. *Computers and Structures*, 82, 781-798.
- Li, X., Zhang, H., & Lu, Z. (2019). A differential evolution algorithm based on multi-population for economic dispatch problems with valve-point effects. *IEEE Access*, 7 (2019), 95585-95609.
- Mahdavi, M., Fesanghary, M., & Damangir, E. (2007). An improved harmony search algorithm for solving optimization problems. *Applied Mathematics and Computation*, 188, 1567-1579.
- Mohamed, A. A., Mohamed, Y. S., El-Gaafary, A. A. M., & Hemeida, A. M. (2017). Optimal power flow using moth swarm algorithm. *Electric Power Systems Research*, 142 (Jan 2017), 190-206.
- Niknam, T. (2010). A new fuzzy adaptive hybrid particle swarm optimization algorithm for non-linear, non-smooth and non-convex economic dispatch problem. *Appl. Energy*, 87(1), 327–339.
- Öztürk, A., Çobanlı, S., Duman, S., Tosun, S., & Döşoğlu, K. (2011). Yapay arı kolonisi algoritması ile elektrik güç sistemi optimal yakıt maliyetinin belirlenmesi (in Turkish). 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11), 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey, 311-316.

- Rahman, T.K.A., Suliman, S.I., & Musirin, I. (2006). Artificial immune-based optimization technique for solving economic dispatch in power system. In: Apolloni B., Marinaro M., Nicosia G., Tagliaferri R. (eds) Neural Nets. WIRN 2005, NAIS 2005. Lecture Notes in Computer Science, 3931, Berlin, Heidelberg: Springer.
- Reddy, A. S. & Vaisakh, K. (2013). Shuffled differential evolution for large scale economic dispatch. *Electr. Power Syst. Res.*, 96, 237–245.
- Ross, D. W. & Kim, S. (1980). Dynamic economic dispatch of generation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 99(6), 2060-2068.
- Sahoo, S., Dash, K.M., Prusty, R.C., & Barisal, A.K. (2015). Comparative analysis of optimal load dispatch through evolutionary algorithms. *Ain Shams Engineering Journal*, 6(1), 107-120.
- Secui, D. C. (2015). A new modified artificial bee colony algorithm for the economic dispatch problem. *Energy Convers. Manage.*, 89(1), 43–62.
- Secui, D. C. (2016). A modified Symbiotic Organisms Search algorithm for large scale economic dispatch problem with valve-point effects. *Energy*, 113(15), 366–384.
- Sinha, N., Chakrabarti, R., & Chattopadhyay, P.K., (2003). Evolutionary programming techniques for economic load dispatch, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 7(1), 83-94.
- Smith, A. E., & Coit, D. W. (1997). Constraint-handling techniques - penalty functions. In *Handbook of Evolutionary Computation - Chapter C5.2.*, Bristol, U.K.: Institute of Physics Publishing and Oxford University Press.
- Song, Y. H., Chou, C. S. V., & Min, Y. (1999). Large-scale economic dispatch by artificial ant colony search algorithms. *Electric Machines and Power Systems*, 27(7), 679-690.
- Subathra, M. S. P., Selvan, S. E., Victoire, T. A. A., Christinal, A. H., & Amato, U. (2015). A hybrid with cross-entropy method and sequential quadratic programming to solve economic load dispatch problem. *IEEE Syst. J.*, 9(3), 1031–1044.
- Tefek, M. F., Güçyetmez, M., & Uğuz, H. (2018). Solution of economic dispatch problem with the valve-point load effect by meta-heuristic algorithms. *Technological Applied Sciences*, 13(3), 253-263.
- Tosun, S., Öztürk, A., Erdoğan, P., Biçen, Y. & Hasırcı, U. (2009). Elektrik güç sistemlerinde optimal yakıt maliyetinin benzetim tavlama (BT) algoritması ile belirlenmesi (in Turkish). 5.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IAT'09), 13-15 May 2009, Karabük, Turkey, 254-258.
- Victoire T. A. A., & Jeyakumar, A. E. (2004). Hybrid PSO–SQP for economic dispatch with valve-point effect. *Electr. Power Syst. Res.*, 71(1), 51–59.
- Vlachogiannis, J. G., & Lee, K. Y. (2010). Economic load dispatch—A comparative study on heuristic optimization techniques with an improved coordinated aggregation-based PSO. *IEEE Trans. Power Syst.*, 25(1), 591–592.
- Wang, S. K., Chiou, J. P. & Liu, C. W. (2007). Non-smooth/non-convex economic dispatch by a novel hybrid differential evolution algorithm. *IET Gener., Transmiss. Distrib.*, 1(5), 793–803.
- Wood, A. J., & Wollenberg, B. F. (2006). *Power Generation Operation and Control*. New York: John Wiley & Sons, Inc., Second ed.
- Xiong, G., Shi, D., & Duan, X. (2013). Multi-strategy ensemble biogeography-based optimization for economic dispatch problems. *Applied Energy*, 111, 801-811.
- Yalcinoz, T., & Altun, H. (2001). Power economic dispatch using a hybrid genetic algorithm. *IEEE Power Engineering Letters*, *IEEE Power Eng. Review*, 21(3), 59-60.
- Yalçınöz, T., Yavuzer, T., & Altun, H. (2002). Tabu araştırması uygulanarak ekonomik yük dağıtım problemi çözümü (in Turkish). *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO'2002)*, 18-22 Dec 2002, Bursa, Turkey, 30-34.
- Yang, H.-T., Yang, P.-C. & Huang, C.-L. (1996). Evolutionary programming based economic dispatch for units with non-smooth fuel cost functions, *IEEE Transactions on Power Systems*, 11(1), 112-118.

Yang, X.-S.(2014) Nature-inspired optimization algorithms. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.

Zhao, J., Liu, S., Zhou, M., Guo, X., & Qi, L. (2018). Modified cuckoo search algorithm to solve economic power dispatch optimization problems. *IEEE/CAA J. Autom. Sinica*, 5(4), 794–806.



Betonarme Kolonların Yerdeğiştirme Kapasitesi Tahmini için Analitik Çalışma

Analytical Study for Estimation of Displacement Capacity of Reinforced Concrete Columns

Dr. Sinan Cansız¹ 

¹*Istanbul Aydın Üniversitesi-Beşyol, 34083 İstanbul, TÜRKİYE*

Başvuru/Received: 24/01/2021

Kabul / Accepted: 09/04/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 23/05/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Betonarme yapıların davranışında süneklik talebinin belirlenmesinde en önemli eleman olarak kolonlar önce çıkmaktadır. Betonarme kolonların davranışını etkileyen başlıca parametreler; aksel yük seviyesi, kesme açıklığı, boyuna donatı yüzdesi ve enine donatı yüzdesi olarak sıralanabilir. Bu çalışma kapsamında Seismo-Struct programında modellenmiş çeşitli özelliklere sahip betonarme kolonların sismik analizi yapılmıştır. Analitik sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırılarak analitik modeller doğrulanmıştır. Analitik modellerin sonuçları incelendiğinde betonarme kolonların kalıcı dönme oranının deprem veya yükleme sonrası yapıda oluşan hasarın nitelendirilmesinde kullanılabileceği görülmektedir. Ayrıca FEMA356 yönetmeliğinde betonarme kolonların kalıcı dönme oranına göre performans seviyesi tanımlanmaktadır. Bu çalışma sonucunda betonarme kolonların son limit durumundaki yerdeğiştirme kapasitesini ve kalıcı dönme oranını hesaplayan analitik bağıntı önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler

“Kolon, Betonarme, Yerdeğiştirme Kapasitesi, Sismik Analiz”

Abstract

Reinforced concrete columns are the most important structural elements that determine the ductility of the structures. The main parameters affecting the behavior of reinforced concrete columns are axial load level, shear span, percent of longitudinal reinforcement and percent of transverse reinforcement. In the context of this study, seismic analysis of reinforced concrete columns with various features modeled in the Seismo-Struct program was performed. Analytical models were verified by comparing the analytical results with the experimental results. When the results of analytical models are examined, it can be seen that the residual drift ratio of reinforced concrete columns can be used to characterize the damage occurred in the structure after earthquake or loading. In addition, the performance level of the reinforced concrete columns according to the residual drift ratio is defined in FEMA356. As a result of this study, the analytical equation that calculates the displacement capacity of the reinforced concrete columns and residual drift ratio of the reinforced concrete columns at the ultimate displacement limit is proposed.

Key Words

“Column, Reinforced Concrete, Displacement Capacity, Seismic Analysis”

1. Giriş

Betonarme yapıların tasarımında şekil değiştirme esaslı yaklaşımlar ile kuvvet esaslı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmeliğe (2007) göre betonarme yapıların mevcut performansının tespitinde şekil değiştirme esaslı yaklaşımlar kullanılmaktadır. 2018 yılında yayımlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ile şekil değiştirme esaslı yaklaşımlar ile yeni binaların tasarımına yer verilmiştir. 1990'lı yıllarda gerçekleşen Kobe ve Northridge depremleri sonrası kuvvet esaslı yaklaşımlar ile tasarlanmış yapıların deprem sonrası kullanımının uygun olmaması sebebiyle ekonomik kayıplara sebep olmuştur. Ardından performansa dayalı tasarım yaklaşımı benimsenerek hedef performansa bağlı yapıların tasarımına ağırlık verilmiştir. Performansa dayalı tasarım veya şekil değiştirme esaslı yaklaşımların en önemli parametrelerinden birisi tasarımda şekil değiştirme limitlerinin kullanılması olarak öne çıkmaktadır. Belirli değere kadar şekil değiştirme tanımlanan yapılarda deprem sonrası belirli hasarın oluşmasına izin verilmektedir.

Betonarme kolonların hasar durumu üzerine birçok araştırmacı çalışma yapmıştır. Meral'in (2019) yapılan çalışmasında 2007 deprem yönetmeliğine göre tasarlanmış 4 ve 7 katlı binalarda, kısa kolon etkilerini araştırmıştır. Çalışma sonucunda 4 katlı yapılarda kısa kolon sonucu hasar durumu %40 seviyesinde iken, 7 katlı kısa kolonlu binalarda hasar seviyesi %60 mertebesinde tespit edilmiştir.

Aykaç vd. 2014 yılında yapılan çalışmalarında dikdörtgen kesite sahip betonarme kolonların yaklaşık hesabı için basit bir formülasyon önermiştir. Eksenel yük seviyesi yüksek kolonlarda bile doğru sonuçlar verebilen formülasyon ile yaklaşık %15 hata payı ile betonarme kolonların donatısı hesaplanabilmektedir.

Forougi ve Yüksel (2019) Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine (TBDY-2018) göre betonarme kolonlar şekil değiştirme hasar sınırları üzerine analitik çalışma yapmıştır. Bu bağlamda farklı donatı ve en kesit özelliklerine sahip betonarme kolonların analitik olarak şekil değiştirme hasar sınırları farklı performans durumlarına karşılık gelecek şekilde hesaplanmıştır. Çalışmanın sonucunda betonarme kolonların tasarımını etkileyen parametrelerin şekil değiştirme hasar sınırlarına etkisi belirlenmiştir.

Bae ve Bayrak (2008) tarafından hazırlanan makale çalışmasında, yeni bir plastik mafsal modeli hazırlanmıştır. Önerilen plastik mafsal modeli eksenel yükün etkisini dikkate alarak, mevcut plastik mafsal modelleriyle karşılaştırılmıştır. Deneysel ve literatürdeki verilere göre önerilen plastik mafsal modelinin uygun sonuçlar verdiği görülmüştür.

El-Bahy, Kunnath, Stone ve Taylor (1997) tarafından yapılan çalışmada, farklı yükleme durumlarına sahip 12 betonarme kolonun sismik analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yükleme şekillerinin betonarme kolonların davranışına nasıl etki ettiği görülmüş ve yeni bir hasar modeli hazırlanmıştır.

Azizinamini, Corley ve Johal (1992) tarafından yapılan çalışmada farklı eksenel yük seviyesi ve farklı enine donatı oranına sahip 12 betonarme kolonun sismik yükler altında deneysel analizi yapılmıştır. Çalışma kapsamında araştırılan parametreler; eksenel yük seviyesi ve enine donatı detayları yer almaktadır. Çalışma sonucunda yeni enine donatı detayları tanımlanmış ve test edilerek doğruluğu kanıtlanmıştır.

Elwood ve Moehle tarafından yapılan çalışmada betonarme kolonların yerdeğiştirme bileşenleri ile FEMA356 yönetmeliğinde bulunan iskelet eğrisi metodunu kullanarak betonarme kolonların dönme kapasitesi üzerine inceleme yapılmıştır.

Lehmann ve Moehle (2000) tarafından hazırlanan çalışmada, hasar indekslerinin tekrarlı yükler altında sonuçları irdelenmiştir. Çalışma neticesinde deneysel sonuçlar kullanılarak yeni bir hasar modeli geliştirilmiştir. Analitik araştırmada, deneysel sonuçlar kullanılarak eleman hasarını değerlendirmek için mühendislik parametrelerini sayısal olarak değerlendirme yöntemleri geliştirilmiştir. Araştırma sonuçları betonarme köprü kolonları için performansa dayalı yaklaşımı geliştirmek amacıyla kullanılmıştır.

Öztürk (2003) tarafından yapılan tez çalışmasında betonarme yapıların deprem yüklerine karşı sismik dönme taleplerinin değerlendirilmesi için basit bir prosedür önerilmiştir. Öztürk tarafından 2007 yılında sunulan çalışmasında da önceki çalışmasının devamı olarak, sismik bölgelerdeki yapıların dönme talepleri incelenmiştir.

Ülkemizde deprem sonrası kullanılan önemli sayıda yapı stoğu bulunmaktadır. Bu yapıların mevcut performansının tespiti için sismik yönetmeliklerde tanımlanan yöntemler birçok araştırmacı tarafından hazırlanan deney setleri ile araştırılmıştır. Bu çalışmalarda genellikle tasarıma etki eden sınırlı parametreler sınırlı aralıklarda incelenmiştir. Betonarme kolona etki eden parametrelerin oluşabilecek değer aralıklarının tamamında deney yapımının maliyetli ve süre alması sebebiyle performansa dayalı tasarımda istenen seviyede ilerleme kaydedilememiştir. Betonarmenin davranışını anlayabilmek için en önemli gerekliliklerden birisi aynı deney seti üzerinde birçok parametrenin incelenmesidir. Deneysel olarak yapılması zor durumu analitik olarak değerlendirmek hem maliyetsiz hem de daha az zamanla gerçekleştirilebilmektedir. Literatürdeki önceki çalışmalar incelendiğinde genellikle belli parametreler altında betonarme kolonun az sayıda üretilen kolon numunelerinin davranışı incelenmiştir. Ayrıca deneyde incelenen kolonların sayısı ve incelenen parametrelerin az sayıda olması sebebiyle betonarme kolonların davranışına tam etkisi detaylıca incelenememiştir. Bu çalışmanın diğer çalışmalardan farkı ise betonarme kolon tasarımına etki eden en önemli parametreler geniş değişken aralığında

incelenerek kolonların tümünden davranışı incelenmiştir. Çalışma kapsamında üretilen analitik model deneysel çalışmalar ile doğrulanarak, çalışmanın güvenilirliği artırılmıştır.

Bu çalışma kapsamında betonarme kolonların tasarım parametreleri dikkate alınarak hazırlanmış 16 adet betonarme kolonun Seismo-Struct programı ile sismik analizi yapılmıştır. Analizi yapılan kolonlar seçilirken TBDY-2018'e göre yapılacak en büyük ve en küçük parametreler seçilerek en üst ve en alt kapasite oranları belirlenmiştir.

2. Analitik Modeller

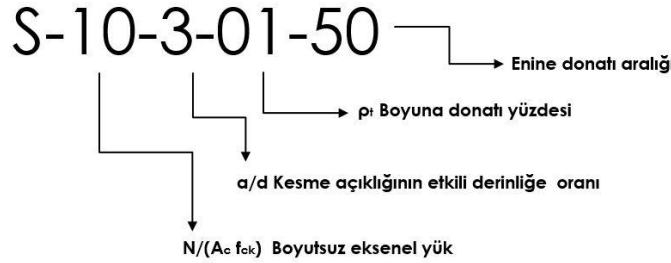
Bu çalışmada analizi yapılan 16 adet betonarme kolonun seçiminde kullanılan TBDY'e göre sınır değer aralıkları Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. TBDY-2018'e göre sınır değerler

Parametre	Minimum	Maksimum
Eksenel yük seviyesi	0.1	0.4
Boyuna donatı yüzdesi	0.01	0.04

Kesme açıklığı için TBDY'de belirtilen sınır değer olmaması sebebiyle, kesme açıklığının etkili derinliğe oranı (a/d) 3-10 arası değerler seçilmiştir. Betonarme kolonların seçiminde eksenel yük seviyesi için TBDY-2018'de tanımlanan üst ve alt sınır değerleri seçilmiştir. Benzer şekilde TBDY-2018'de boyuna donatı yüzdesi içinde üst ve alt sınır değerleri seçilerek limit durumlar araştırılmıştır. Enine donatı yüzdesi için ise betonarme yapıların tasarımında sıklıkla kullanılan 50 mm-100 mm etriye aralıklarına karşılık gelen değerler seçilmiştir.

Çalışmada kullanılan analitik olarak modellenmiş kolonların isimlendirilmesinde kullanılan kısaltmalar Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Bu çalışmada kullanılan kısaltmalar

Bu çalışmada seçilen kolonlar ve özellikleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Kolonlara ait özellikler

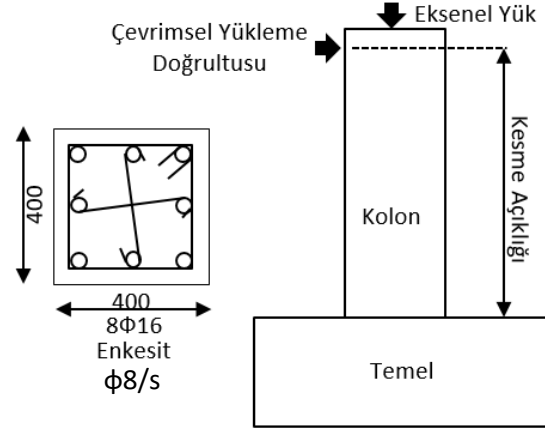
Kolon Adı	$N/A_c f_{ck}$	a/d	ρ_t	s (mm)
S-10-3-01-50	0.1	3	0.01	50
S-10-3-01-100	0.1	3	0.01	100
S-10-3-04-50	0.1	3	0.04	50
S-10-3-04-100	0.1	3	0.04	100
S-10-10-04-50	0.1	10	0.04	50
S-10-10-04-100	0.1	10	0.04	100
S-10-10-01-50	0.1	10	0.01	50
S-10-10-01-100	0.1	10	0.01	100
S-40-3-01-50	0.4	3	0.01	50
S-40-3-01-100	0.4	3	0.01	100
S-40-3-04-50	0.4	3	0.04	50
S-40-3-04-100	0.4	3	0.04	100

Tablo 2 (devam). Kolonlara ait özellikler

Kolon Adı	$N/A_c f_{ck}$	a/d	ρ_t	s (mm)
S-40-10-04-50	0.4	10	0.04	50
S-40-10-04-100	0.4	10	0.04	100
S-40-10-01-50	0.4	10	0.01	50
S-40-10-01-100	0.4	10	0.01	100

Burada; N eksenel yükü, A_c kesit alanını, f_{ck} beton basınç dayanımını, a kesme açıklığını, d etkili yüksekliği, ρ_t boyuna donatı yüzdesini ve s etriye aralığını göstermektedir.

Tüm analitik modellerde C30/S420 malzemesi ile $\phi 8$ etriye kullanılmıştır. Boyuna donatı için ise; boyuna donatı yüzdesi 0.04 olan kolonlarda $20\phi 20$, boyuna donatı yüzdesi 0.01 olan kolonlarda ise $8\phi 16$ simetrik düzen kullanılmıştır. Çalışma kapsamında üretilen analitik modeller 400 mm / 400 mm en kesite sahip kare kolon seçilmiştir. Kolonların şematik en kesiti ve yükleme düzeni Şekil 2’de gösterilmektedir.

**Şekil 2.** Şematik kesit ve yükleme düzeni

Tüm kolonlara benzer şematik yükleme profili uygulanmıştır. Tüm kolonlara uygulanan yükleme profili Şekil 3’de gösterilmektedir. Yükleme profilinde akma yer değiştirmesinin artan katları olarak, $0.5\mu-1\mu-1.5\mu-2\mu-3\mu-4\mu-\dots\mu$ şeklinde uygulanmıştır. Tüm kolonların akma yer değiştirmesi; Seismo-Struct programında monotonik yükleme altında tespit edilmiştir. Yükleme hızı olarak tüm modellerde saniyede 0.1 mm artacak şekilde uygulanmıştır.

2.1. Bilgisayar Programında Modelleme

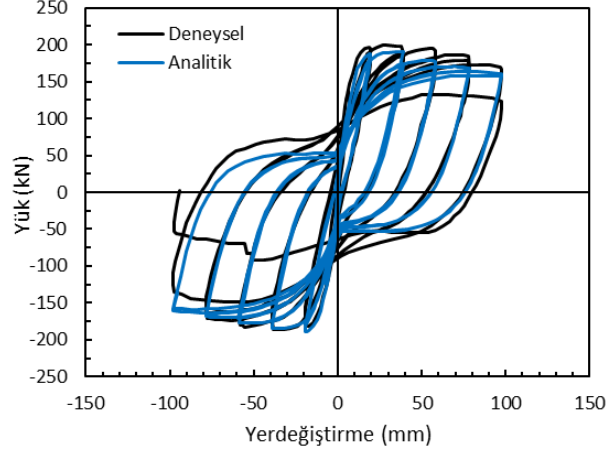
Çalışma kapsamında üretilen analitik modeller Seismo-Struct programı kullanılarak analiz edilmiştir. Oluşturulan modellerin doğruluğu için literatürde kullanılan 3 deneysel veri kullanılmıştır. Bu amaçla PEER veritabanında seçilen deneysel kolonlar ve özellikleri Tablo 3’de verilmiştir. Özellikleri gösterilen kolonların analitik modelleri Seismo-Struct programında aynı malzeme dayanımlarına sahip olacak şekilde modellenmiştir. Sargılı-sargısız beton için Mander modeli (Mander vd. 1988) ve donatı çeliği için Menegetto-Pinto modeli seçilerek Seismo-Struct programında malzeme özelliklerinde tanımlanmıştır. Plastik mafsal kabulünde ise otomatik değer kabul edilerek, programca her çevrimde hesaplanan plastik mafsal boyu dikkate alınmıştır.

Tablo 3. Deneysel kolonlara ait özellikler

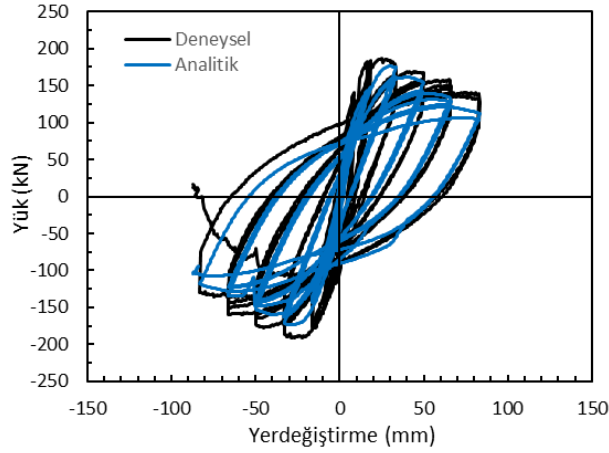
Kolon Adı	$N/A_c f_c$	a/d	ρ_t	ρ_h
Soesianawati vd. 1986 No:1	0.1	4.26	0.015	0.002
Saatcioglu ve Grira 1999, BG-2	0.42	5.20	0.019	0.005
Aziznamini vd. 1988, NC-2	0.2	3.43	0.019	0.005

Burada; N eksenel yükü, A_c kesit alanını, f_c beton basınç dayanımını, a kesme açıklığını, d etkili yüksekliği, ρ_t boyuna donatı yüzdesini ve ρ_h enine donatı yüzdesini (TBDY) ifade etmektedir

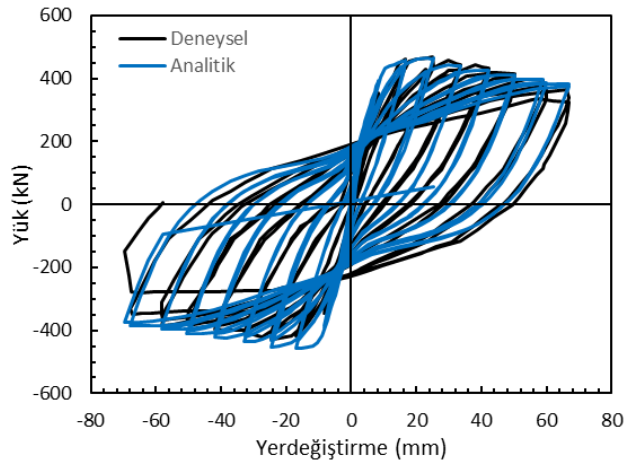
Tablo 3’de verilen kolonlar Seismo-Struct programı kullanılarak modellenmiştir. Deneysel veriler ile program sonucunda elde edilen analitik sonuçlar yük-yerdeğiştirme grafikleri üzerinde karşılaştırılarak Şekil 3-5’de gösterilmiştir.



Şekil 3. Soesianawati vd. 1986 No:1 kolonu için deneysel ve analitik sonuçların karşılaştırılması



Şekil 1. Saatcioglu ve Grira 1999, BG-2 kolonu için deneysel ve analitik sonuçların karşılaştırılması



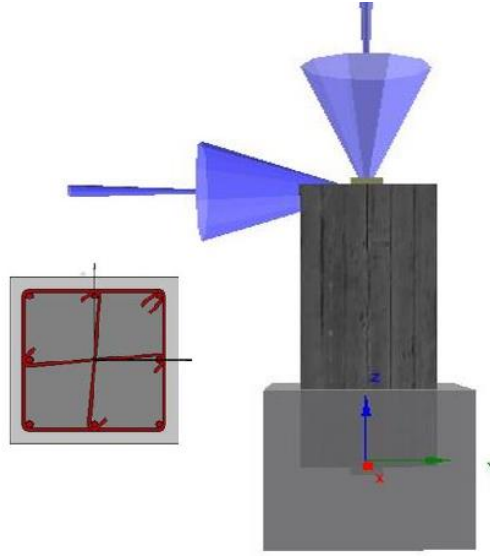
Şekil 2. Azizinamini vd. 1988, NC-2 kolonu için deneysel ve analitik sonuçların karşılaştırılması

Analitik sonuçlar ve deneysel sonuçların sayısal olarak karşılaştırılması Tablo 4’de sunulmaktadır.

Tablo 4. Deneysel-Analitik sonuçların karşılaştırılması

Kolon Adı	Akma Yerdeğiştirmesi (mm)			Yük (kN)			Süneklik		
	$\Delta_{y,den.}$	$\Delta_{y,anl.}$	Hata (%)	$P_{maks,den.}$	$P_{maks,anl.}$	Hata (%)	$\mu_{den.}$	$\mu_{anl.}$	Hata (%)
Soesianawati vd. 1986 No:1	21	19	-9.25	201	191	-4.90	4.76	5.26	+10.50
Saatcioglu ve Grira 1999, BG-2	17	19	+11.76	187	176	-3.70	4.70	4.21	-10.42
Azzizamini vd. 1988, NC-2	16	14	+12.50	458	465	+1.50	4.37	5.00	+14.41

Analitik sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında Seismo-Struct programına ait sonuçların deneysel sonuçlara çok yakın olduğu görülmüştür. Tablo 4 incelendiğinde maksimum yükü analitik modellemede oldukça iyi tahmin ederken, akma yer değiştirmesi ve süneklik kapasitesini ortalama %12 hatalı tespit etmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında incelenen kalıcı dönme oranını ve yerdeğiştirme kapasitesinin gerçek değere çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Program içerisinde kalıcı yerdeğiştirme değerini etkileyen plastik mafsal boyunun doğru modellenmesi ile gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu bağlamda modellenen kolonların program görüntüleri Şekil 6'da gösterilmektedir.

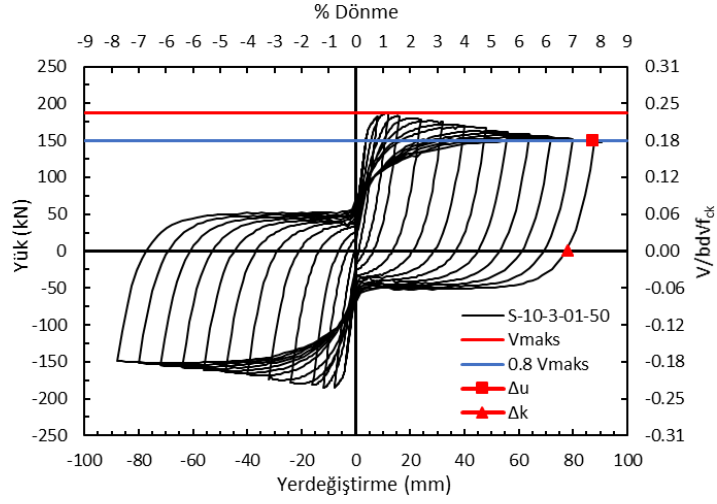
**Şekil 3.** Modellenen kolonlara ait görüntüler

3. Analitik Modellere ait Sonuçlar

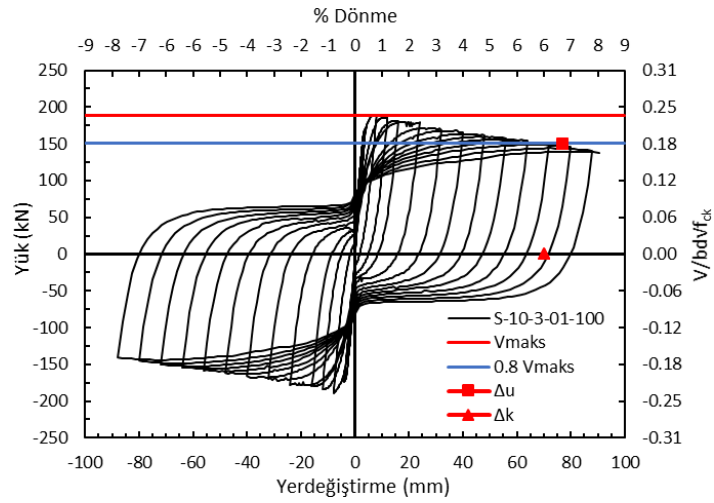
EUROCODE-8 yönetmeliğine göre betonarme kolonların göçme öncesi performans düzeyi, yatay yük taşıma kapasitesinde %20 azalmaya karşılık gelen yerdeğiştirme değeri olarak tanımlanmıştır. Benzer şekilde FEMA356 Amerikan standardında ise betonarme kolonların boyutsuz aksel yük seviyesi ile boyutsuz kesme kuvvetine bağlı belirlenen plastik dönme oranı ile tanımlanmıştır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (2018) ise malzeme birim şekil değiştirme değerlerine göre belirlenen plastik dönme kapasitesi ile tanımlanmıştır. Önceki deneysel çalışmalar incelendiğinde betonarme kolonlarda yatay yük taşıma kapasitesinde %20 azalma meydana getiren yerdeğiştirme altında ağır hasar olduğu görülmüştür. Dünyada yaygın olarak kullanılan sismik yönetmelikler bu hasar altında yapının göçme öncesi performans seviyesinde olduğunu tanımlamaktadır. Özetle ulusal ve uluslararası kullanılan sismik yönetmeliklerde farklı parametrelere göre hesap yapan farklı bağıntılar ile aynı nokta tespit edilmeye çalışılmaktadır.

Seismo-Struct programı ile yapılan sismik analiz sonucu kolonların yük-yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 7-22'de sırasıyla gösterilmiştir. Bu amaçla tüm kolonların yük-yerdeğiştirme ilişkileri üzerinde maksimum yatay kuvvet (kırmızı çizgi) ve $0.8 V_{maks}$ değeri (mavi çizgi) işaretlenmiştir.

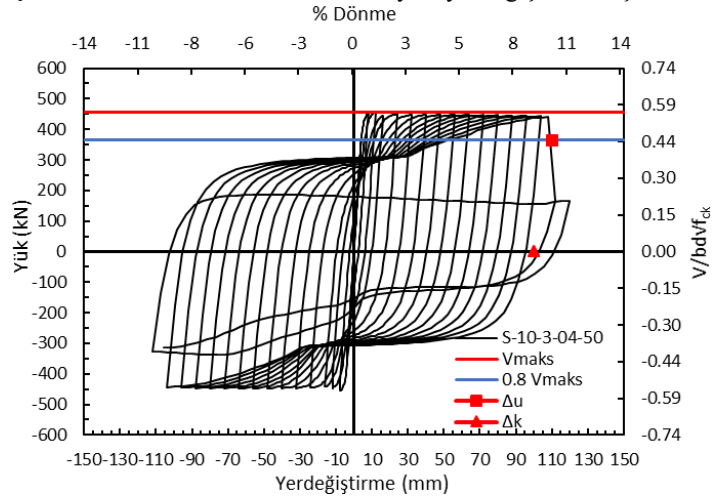
Çalışma kapsamında tüm analitik modellerin; yerdeğiştirme kapasitesi (Δ_u), yerdeğiştirme kapasitesi altında oluşan kalıcı yerdeğiştirme (Δ_k), maksimum dönme oranı (θ_u) ve yerdeğiştirme kapasitesi altında hesaplanan kalıcı dönme oranı (θ_k) belirlenmiştir. Hesaplanan bu parametreler her şekil üzerinde işaretlenerek gösterilmiştir. Ayrıca grafik üzerinde birincil düşey eksen kesme kuvvetini, ikincil düşey eksen FEMA356'da tanımlanan boyutsuz kesme kuvvetini, birincil yatay eksen yatay yerdeğiştirmeyi ve ikincil yatay eksen kolon numunesi tepe yer değiştirmesine göre oluşan yüzdece dönmeyi göstermektedir.



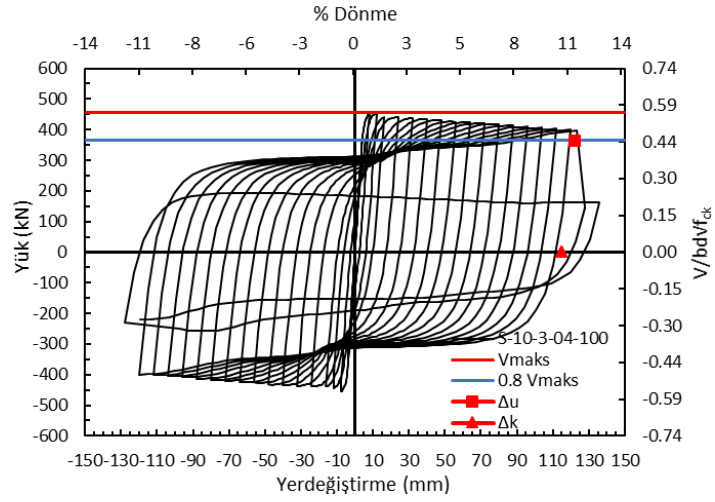
Şekil 4. S10-3-01-50 kolonuna ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi



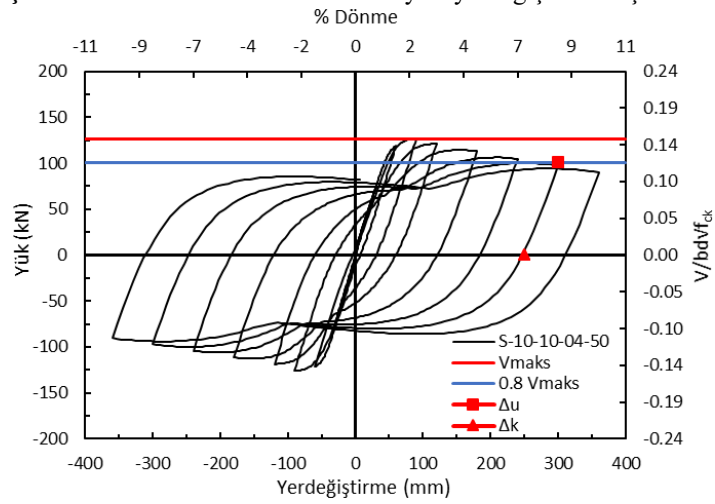
Şekil 8. S10-3-01-100 kolonuna ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi



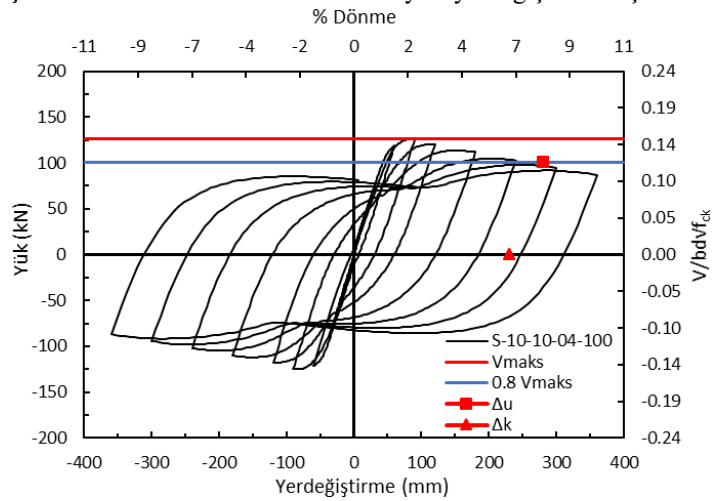
Şekil 9. S10-3-04-50 kolonuna ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi



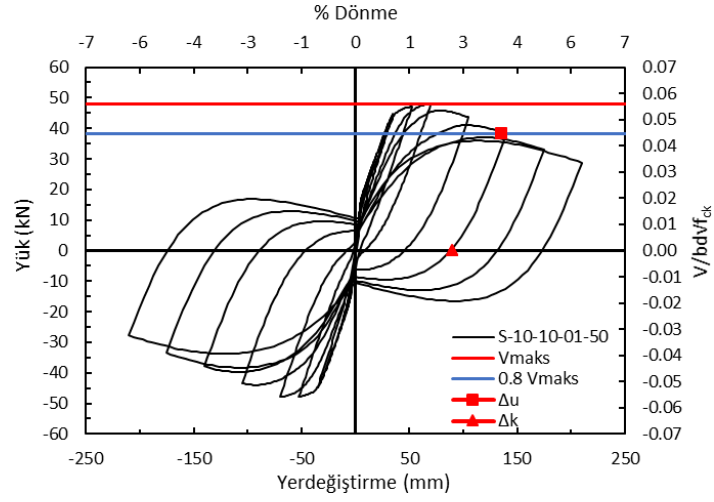
Şekil 10. S10-3-04-100 kolonuna ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi



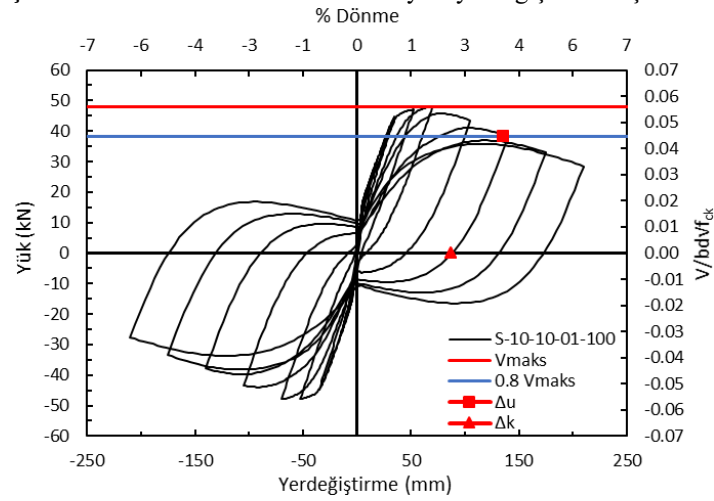
Şekil 11. S10-10-04-50 kolonuna ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi



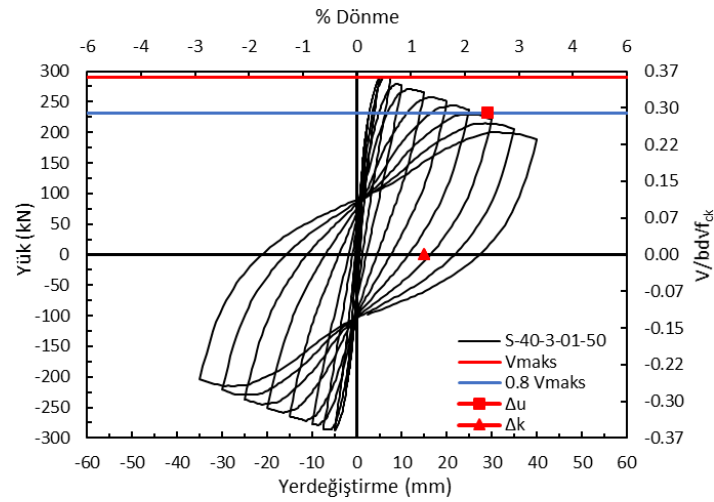
Şekil 12. S10-10-04-100 kolonuna ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi



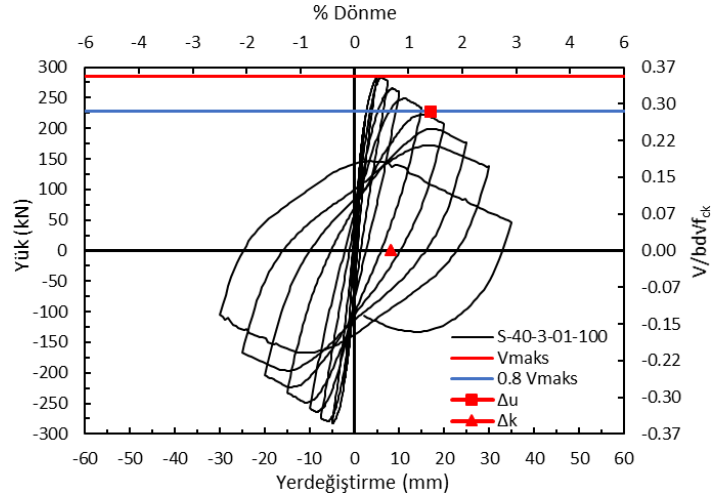
Şekil 13. S10-10-01-50 kolonuna ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi



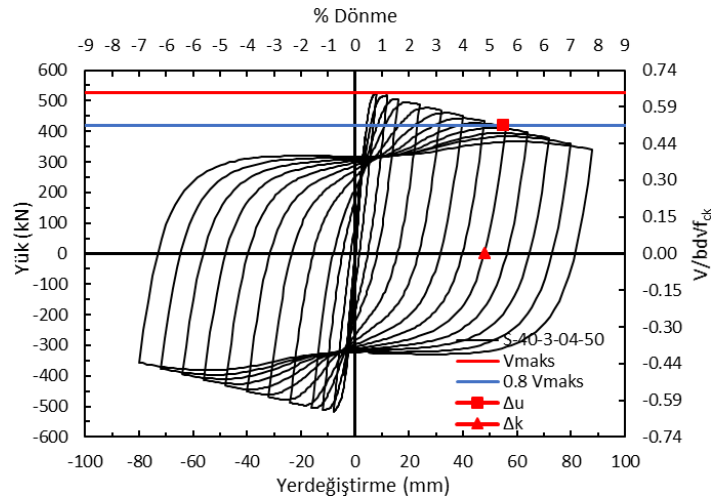
Şekil 14. S10-10-01-100 kolonuna ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi



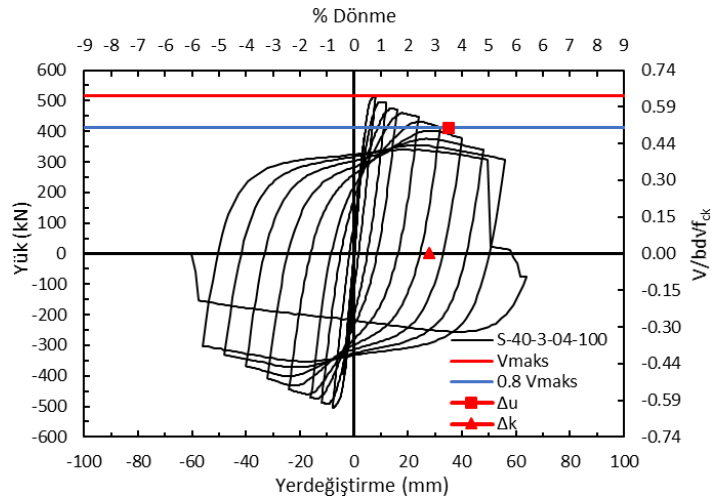
Şekil 15. S40-3-01-50 kolonuna ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi



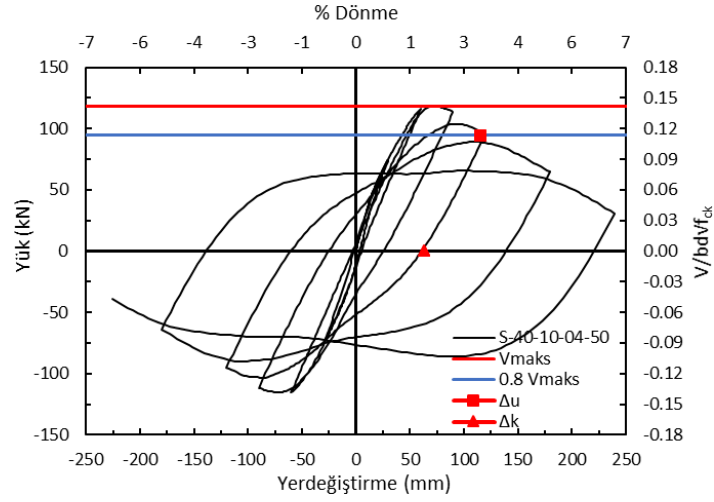
Şekil 16. S40-3-01-100 kolonuna ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi



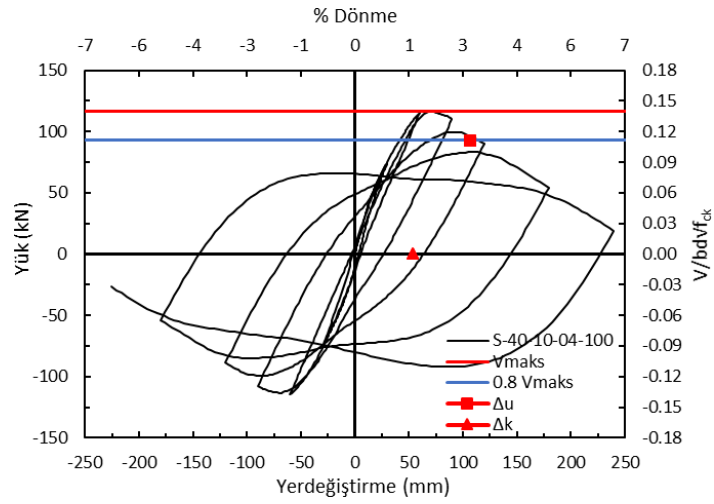
Şekil 17. S40-3-04-50 kolonuna ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi



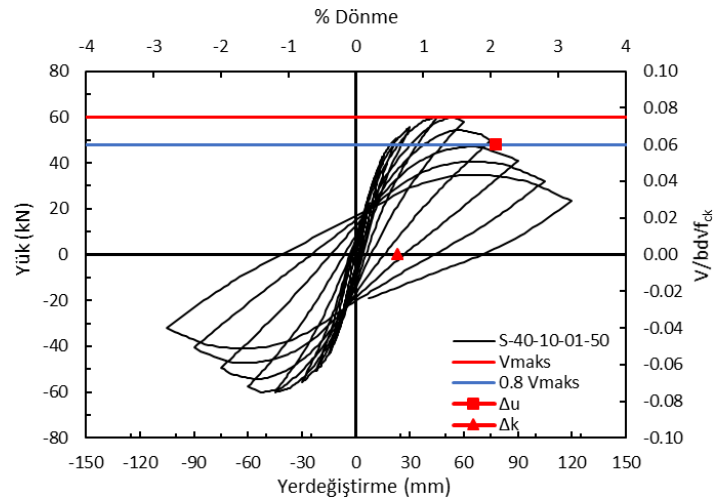
Şekil 18. S40-3-04-100 kolonuna ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi



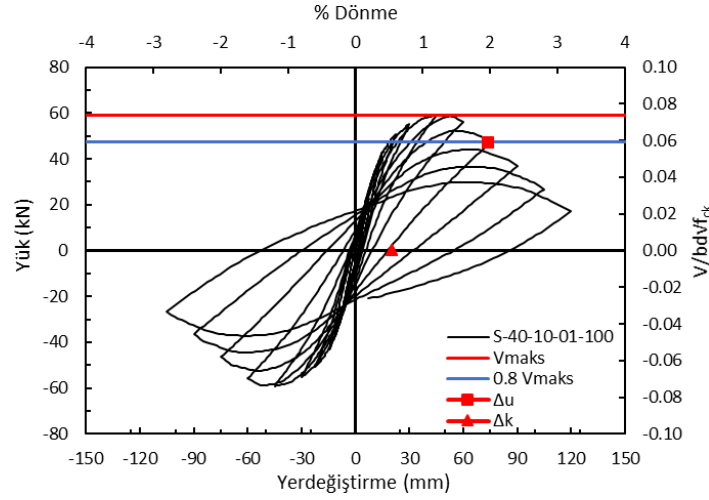
Şekil 19. S40-10-04-50 kolonuna ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi



Şekil 20. S40-10-04-100 kolonuna ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi



Şekil 21. S40-10-01-50 kolonuna ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi



Şekil 22. S40-10-01-100 kolonuna ait yük-yerdeğiştirme ilişkisi

4. Değerlendirme ve Tartışma

Dünyadaki birçok uluslararası ve ulusal deprem yönetmelikleri betonarme elemanların performansını belirli parametrelere göre hesaplamaktadır. Bu yönetmeliklerin ortak yönlerinden birisi ortalama olarak yatay yük taşıma kapasitesinde yaklaşık %20-30 arasında azalma meydana getiren yerdeğiştirme değeri kapasite olarak tanımlanmaktadır. Bu amaçla bu çalışmada sismik analizi yapılan 16 betonarme kolonun yatay yük taşıma kapasitesinde %20 azalma meydana getiren yer değıştirme Şekil 8-23’de kırmızı ile gösterilen doğru olarak işaretlenmiştir.

Betonarme yapıların deprem sonrası hasarın göstergesi olarak taşıyıcı elemanlarda meydana gelen kalıcı yerdeğiştirme değeri güvenli bir veri olarak değerlendirilebilir. Deprem sonrası yapılarda oluşan hasarlara bakarak elemanın veya yapının performansını pratik olarak belirlemek birçok yapının hızlı değerlendirilmesi olanağını sağlayabilir. Bu amaçla kalıcı yerdeğiştirmeden elde edilen kalıcı dönme oranı betonarme kolonlarda performansın tayininde birçok yönetmelikte kullanılmaktadır. Bu bağlamda analitik modellenen kolonların sismik analiz sonucunda belirlenen kapasite değerleri Tablo 5’de gösterilmektedir.

Tablo 5. Kolonlara ait maksimum yerdeğiştirme kapasitesi altında meydana gelen kalıcı dönme oranları

Kolon Adı	Δ_u (mm)	Δ_k (mm)	θ_u	θ_k
S-10-3-01-50	87	78	0.081	0.072
S-10-3-01-100	77	70	0.071	0.065
S-10-3-04-50	110	100	0.102	0.093
S-10-3-04-100	122	115	0.113	0.106
S-10-10-04-50	300	250	0.083	0.069
S-10-10-04-100	280	230	0.078	0.064
S-10-10-01-50	135	90	0.038	0.025
S-10-10-01-100	135	87	0.038	0.024
S-40-3-01-50	29	15	0.027	0.014
S-40-3-01-100	17	8	0.016	0.007
S-40-3-04-50	55	48	0.051	0.044
S-40-3-04-100	35	28	0.032	0.026
S-40-10-04-50	115	63	0.032	0.018
S-40-10-04-100	107	54	0.030	0.015
S-40-10-01-50	78	23	0.022	0.006
S-40-10-01-100	74	20	0.021	0.006

Tablo 4’te verilen dönme oranları 1 ve 2 denkleminde elde edilmiştir.

$$\theta_u = \frac{\Delta_u}{L} \quad (I)$$

$$\theta_k = \frac{\delta_k}{L} \quad (II)$$

Tablo 4 irdelendiğinde elde edilen sonuçlar maddeler halinde sıralanmıştır.

- Yanal donatı oranı yüksek kolonlarda maksimum yerdeğiştirme altında daha fazla kalıcı yerdeğiştirme oluşmaktadır. Plastik dönme kapasitesi daha fazla olmaktadır.
- Boyuna donatı yüzdesi yüksek kolonların boyuna donatı yüzdesi düşük kolonlara göre yerdeğiştirme kapasitesi yüksek olduğu gibi kalıcı dönme oranları da yüksek olmaktadır.
- Kesme açıklığı yüksek kolonların kesme açıklığı düşük kolonlara göre yerdeğiştirme kapasitesi daha yüksek olmasına rağmen kalıcı dönme oranı daha düşük olmaktadır.
- Eksenel yük seviyesi kalıcı dönme oranını ve yerdeğiştirme kapasitesini en çok etkileyen parametre olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan araştırma parametrelerinin kalıcı dönme oranlarını değıştirme yüzdeleri Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Tasarım parametreleri ile kalıcı dönme oranı arasındaki ilişki

Parametre	Artış	0k Etki yüzdesi aralığı		
		En az %	En çok %	Ort. %
Eksenel yük seviyesi (N/A_{cfck})	4 kat	-148	-650	-355
a/d oranı	3.33 kat	-46	-192	-98
Boyuna donatı yüzdesi (ρ_t)	4 kat	26	236	139
Enine donatı yüzdesi (ρ_h)	2 kat	4	60	21

Kalıcı dönme oranına etki eden en önemli parametrenin eksenel yük seviyesi olduğu, en az etki eden parametrenin ise enine donatı yüzdesi olarak öne çıkmaktadır. Elde edilen sonuçlar Statistica V10 programı üzerinde analiz edildiğinde parametreler arasındaki korelasyon ilişkisi bu durumu doğrulamaktadır. Analitik sonuçlara göre Statistica programı üzerinden kalıcı dönme oranının tahmini üzerine bağıntı üretildiğinde %98 korelasyon ile doğru sonuç verdiği görülmüştür. Programdan elde edilen bağıntı 3 numaralı denklemden verilmiştir.

$$\theta_{k,tah.} = 0.013 \left(\frac{N}{A_{cfck}} \right)^{-1.05} \left(\frac{a}{d} \right)^{-0.93} + \rho_t (\rho_h^{0.24}) \left(\frac{N}{A_{cfck}} \right)^{-0.63} \quad (III)$$

Betonarme kolonların yerdeğiştirme kapasitesini birçok sismik yönetmelikte farklı bağıntılar ile hesaplanmaktadır. Bu çalışma kapsamında öncelikle betonarme kolonların yerdeğiştirme kapasitesine etki eden parametrelerin etki yüzdesi hesaplanmıştır. Hesaplanan etki yüzdeleri Tablo 7’de sunulmaktadır.

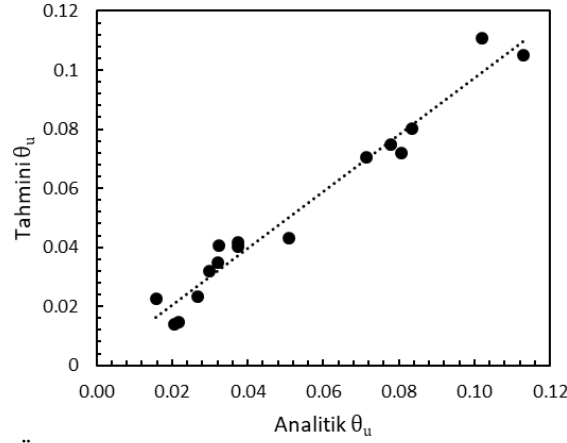
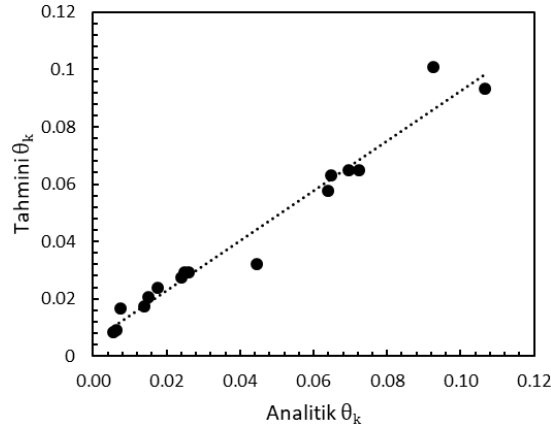
Tablo 7. Tasarım parametreleri ile yerdeğiştirme kapasitesi arasındaki ilişki

Parametre	Artış	0u Etki yüzdesi aralığı		
		En az %	En çok %	Ort. %
Eksenel yük seviyesi (N/A_{cfck})	4 kat	-72	-253	-160
a/d oranı	3.33 kat	-6	-168	-58
Boyuna donatı yüzdesi (ρ_t)	4 kat	25	118	72
Enine donatı yüzdesi (ρ_h)	2 kat	2	40	15

Birçok sismik tasarım yönetmeliklerinde izin verilen değer aralığında imal edilmiş betonarme kolonların yerdeğiştirme kapasitesini tahmini için istatistik programı yardımı ile analizi yapılmıştır. Bu doğrultuda en yakın sonucu veren bağıntı 4 numaralı denklemden sunulmaktadır.

$$\theta_{k,tah.} = 0.014 \left(\frac{N}{A_{cfck}} \right)^{-0.91} \left(\frac{a}{d} \right)^{-0.60} + \rho_t (\rho_h^{0.16}) \left(\frac{N}{A_{cfck}} \right)^{-0.48} \quad (IV)$$

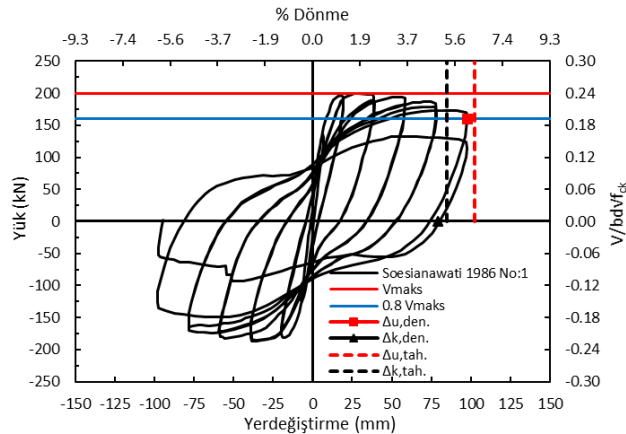
Analitik olarak hesaplanmış kapasite değerleri ile çalışmada önerilen 3 ve 4 numaralı denklemlerde tahmin edilen kapasite değerleri Şekil 23-24’de karşılaştırılmıştır.

Şekil 23. Önerilen denklem ile analitik sonuçların karşılaştırılması (θ_u)Şekil 24. Önerilen denklem ile analitik sonuçların karşılaştırılması (θ_k)

Sonuçlar incelendiğinde her iki bağıntının da analitik sonuçları düzgün tahmin ettiği görülmektedir. İlave olarak çalışmada önerilen bağıntıların doğrulanması amacıyla literatürde kullanılan rastgele seçilmiş ve farklı özelliklere sahip 6 betonarme kolon üzerinde deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçların karşılaştırılması Şekil 25-30'da gösterilmektedir. Deneysel verisi kullanılan kolonların özellikleri Tablo 8'de sunulmuştur.

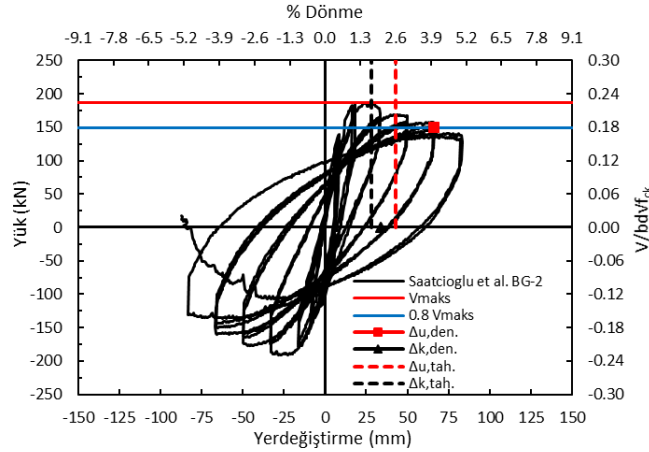
Tablo 8. Deneysel kolonlara ait özellikler

Kolon Adı	$N/A_c f_c$	a/d	ρ_t	ρ_h
Soesianawati vd. 1986 No:1	0.10	4.26	0.015	0.002
Saatcioglu ve Grira 1999, BG-2	0.42	5.20	0.019	0.005
Azizinamini vd. 1988, NC-2	0.20	3.43	0.019	0.005
Tanaka ve Park 1990, No. 2	0.20	4.26	0.015	0.007
Soesianawati vd. 1986 No:3	0.30	4.26	0.015	0.002
Ang vd. 1981, No. 3	0.38	4.26	0.015	0.005



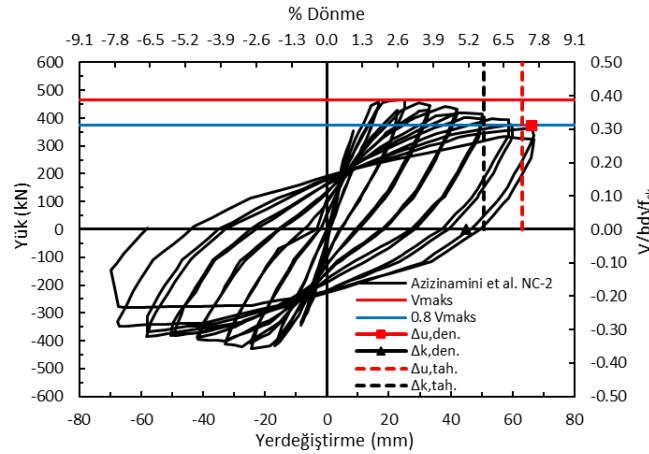
Şekil 25. Soesianawati vd. 1986 No:1 kolonu için deneysel sonuçlar ve önerilen bağıntının karşılaştırılması

Deneyisel sonuçlar ve önerilen bağıntının sonuçları incelendiğinde Soesianawati vd. 1986 No:1 kolonunda çok yakın tahminde bulunduğu görülmektedir. Özellikle yerdeğiştirme kapasitesi ile yerdeğiştirme kapasitesi altında oluşan kalıcı dönme oranını yaklaşık %5 daha fazla hesaplayarak tahmin etmiştir.



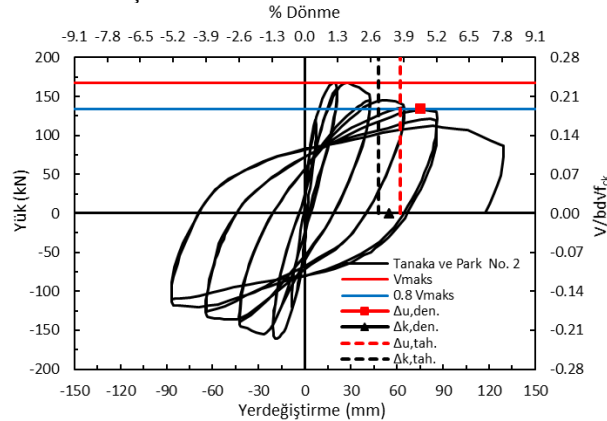
Şekil 26. Saatcioglu ve Grira 1999, BG-2 kolonu için deneysel sonuçlar ve önerilen bağıntının karşılaştırılması

Boyutsuz aksenal yük seviyesi 0.42 olan Saatcioglu ve Grira BG-2 kolonu için kapasiteyi ihtiyatlı kalarak düşük tahmin etmektedir. Yönetmeliklerce izin verilen en yüksek aksenal yük seviyesi değerine sahip olması sebebiyle önem arz etmektedir.



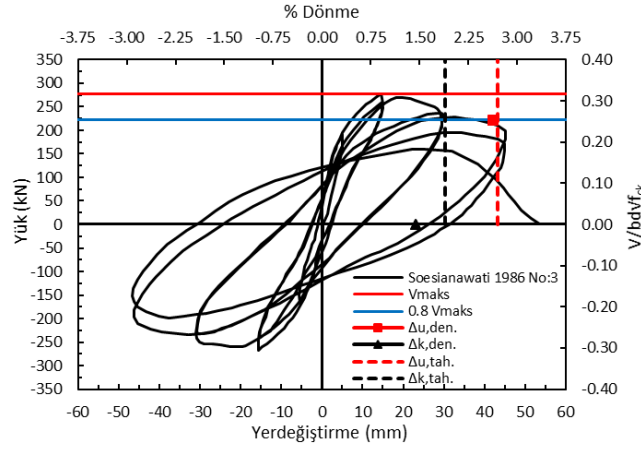
Şekil 27. Aziznamini vd. 1988, NC-2 kolonu için deneysel sonuçlar ve önerilen bağıntının karşılaştırılması

Orta seviye diye değerlendirilebilecek olan boyutsuz aksenal yük seviyesi 0.2 olan Aziznamini vd. 1988, NC-2 kolonu için ise kapasite değerleri ortalama %8 bağıl hata ile tahmin edilmiştir.



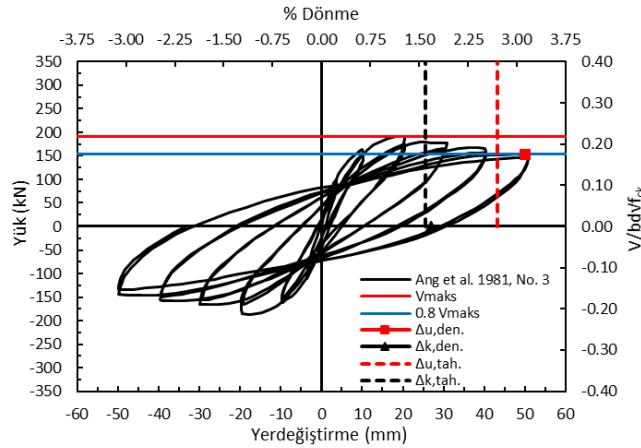
Şekil 28. Tanaka ve Park 1990, No. 2 [15] kolonu için deneysel sonuçlar ve önerilen bağıntının karşılaştırılması

Benzer özelliklere sahip Tanaka ve Park No:2 kolonu için çalışmada önerilen iki bağıntısında kapasite değerlerini yaklaşık %13 bağıl hata ile hesaplamaktadır. Benzer şekilde sismik tasarım yönetmeliklerinde sıklıkla kullanılan aksenal yük seviyesinde oldukça iyi sonuç vermiştir.



Şekil 29. Soesianawati vd. 1986 No:3 kolonu için deneysel sonuçlar ve önerilen bağıntının karşılaştırılması

Boyutsuz eksenel yük seviyesi 0.3 olan Soesianawati vd. 1986 No:3 kolonu için yerdeğiştirme kapasitesi yaklaşık olarak hatasız hesaplanırken, kalıcı dönme oranını veren bağıntı yaklaşık %25 oranında fazla tahmin etmiştir.



Şekil 30. Ang vd. 1981, No. 3 kolonu için deneysel sonuçlar ve önerilen bağıntının karşılaştırılması

Sismik yönetmeliklerde izin verilebilen maksimum boyutsuz eksenel yük seviyesine denk gelen Ang vd. No:3 kolonu için ise yerdeğiştirme kapasitesini tahmin eden bağıntı yaklaşık olarak %8 bağıl hata ile hesaplanmaktadır. Ancak kalıcı dönme oranı ise yaklaşık hatasız hesaplanmaktadır.

5. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında betonarme kolonun sismik yükler altındaki davranışına etki eden parametreler incelenmiştir. Literatürdeki önceki çalışmalar incelendiğinde farklı beton dayanımı, farklı enine donatı oranı, farklı boyuna donatı oranı, farklı en kesit alanı, farklı eksenel yük yüzdesi gibi değişkenler altında kısım kısım incelemeler yapılmıştır. Bazı araştırmacılar enine donatı etkisine yoğunlaşırken, bazıları da eksenel yük seviyesini detaylıca incelemiştir. Bu çalışmada ise betonarme kolon tasarımına etki eden temel parametrelerin yönetmeliklerce sınır kabul edilen minimum ve maksimum değerleri aralığında yatay yükler altında davranışı incelenmiştir. Bu açıdan birçok parametre sabit bir malzeme modeli ve malzeme dayanımı altında incelenmesi, parametrelerin etkisini daha tarafsız bir şekilde ortaya çıkarmaktadır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar maddeler halinde sıralanmıştır.

- Deneysel yük-yerdeğiştirme eğrisi üzerine Seismo-Struct programından elde edilen analitik yerdeğiştirme eğrisi çizdirildiğinde, sonuçların çok yakın olduğu görülmüştür. Seismo-Struct programının gerçek malzeme davranışını yansıtabilmesi sebebiyle deneysel sonuçlara çok yakın değerler verdiği tespit edilmiştir. Bu açıdan programdan elde edilen sonuçlar gerçek davranışı yansıtması sebebiyle, birçok farklı parametrenin doğru bir şekilde incelenme imkanı sunmaktadır.
- Önceki deneysel çalışmalara kıyasla farklı parametrelerle farklı değişken aralığında araştırma yapılmıştır. Kullanılan analitik modelin deneysel veriler ile doğrulanması sebebiyle kolon davranışına etki eden birçok parametre sismik yönetmeliklerde izin verilen geniş spektrumda incelenmiştir. Bu açıdan çalışma literatüre katkı yapacak nitelikte olduğu düşünülmektedir.
- Geniş spektrumda incelenen farklı parametrelerin etkisini dikkate alarak önerilen bağıntılar deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında eksenel yük seviyesi düşük kolonlarda kapasite tahminin çok yakın hesaplanmaktadır. Ayrıca eksenel yük

seviyesi yüksek kolonlarda ise bağıntılar ihtiyatlı kalarak beklenen performansı sağlamaktadır. Sismik yönetmeliklerde izin verilen eksenel yük aralığında iyi sonuçlar verdiği deneysel verilerle kanıtlanmıştır.

- Bu çalışmada önerilen bağıntılar, sismik yönetmeliklerde önerilen kapasite bağıntılarına göre daha sade olması sebebiyle ileriki çalışmalara ışık tutabilecektir.

Referanslar

- ACI 318 (2011). Building code requirements for structural concrete and commentary, American Concrete Institute; Farmington Hills, MI, USA.
- Ang BG, Priestley MJN, Park R. (1981). Ductility of Reinforced Bridge Piers Under Seismic Loading. Report 81-3, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, February.
- Aykaç, S , Aykaç, B , Böcek, M . (2014). Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kolonların Yaklaşık Hesabı İçin Basit Bir Formül . International Journal of Engineering Research and Development , 6 (2) , 13-22 . DOI: 10.29137/umagd.346078
- Azizinamini A, Johal, LS, Hanson NW, Musser DW, Corley WG. (1988). Effects of Transverse Reinforcement on Seismic Performance of Columns - A Partial Parametric Investigation. Project No. CR-9617, Construction Technology,
- Bae, S., & Bayrak, O. (2008). Plastic hinge length of reinforced concrete columns. ACI Structural Journal, 105(3), 290.
- Berry M, Parrish M, Eberhard M, (2004). PEER structural performance database user's manual, Pacific Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, CA, 38.
- CEN (2003). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistant, Part 1. Comité Européen de Normalisation, Brussels.
- Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik DBYBHY (2007). Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- El-Bahy, A., Kunnath, S. K., Stone, W. C., & Taylor, A. W. (1999). Cumulative seismic damage of circular bridge columns: Benchmark and low-cycle fatigue tests. ACI Structural Journal, 96, 633-641.
- Elwood, K. J., & Moehle, J. P. (2005). Drift capacity of reinforced concrete columns with light transverse reinforcement. Earthquake Spectra, 21(1), 71-89.
- FEMA-356. (2000). Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. Report No. FEMA-356, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- Foroughi, S , Yüksel, S . (2019). Betonarme Kolonların Şekil Değiştirme Esaslı Hasar Sınırlarının Araştırılması . International Journal of Engineering Research and Development , 11 (2) , 584-601 . DOI: 10.29137/umagd.519208
- Lehman, D. E. (2000). Seismic performance of well-confined concrete bridge columns.
- Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R., 1988: Theoretical stress-strain model for confined concrete. Journal of the Structural Division. Vol. 114, no. 8, pp. 1804–1826.
- M. Menegotto, P.E. Pinto (1973), Method of analysis for cyclically loaded reinforced concrete plane frames including changes in geometry and non-elastic behaviour of elements under combined normal force and bending, IABSE symposium of resistance and ultimate deformability of structures acted on by well-defined repeated loads, vol. 13, International Association of Bridge and Structural Engineering, Lisbon, Portugal. pp. 15-22
- Meral, E . (2019). Betonarme Binalarda Kısa Kolon Etkilerinin Araştırılması . International Journal of Engineering Research and Development , 11 (2) , 515-527 . DOI: 10.29137/umagd.495192
- Öztürk, B. M. (2003). Seismic drift response of building structures in seismically active and near-fault regions.
- Öztürk, B., (2007). Evaluation of Drift Demand on the Basis of Nonlinear Response of Building Structures Located at Seismically Active Regions . 4th Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Selanik
- Saatcioglu M and Grira M. (1999). Confinement of Reinforced Concrete Columns with Welded Reinforcement Grids. ACI Structural Journal, 96(1), 29-39.

SeismoSoft, S. (2020). A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures. Disponível online em: <http://www.seismosoft.com>.

Soesianawati MT, Park R, Priestley MJN. (1986). Limited Ductility Design of Reinforced Concrete Columns," Report 86-10, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 208 pages.

Tanaka H, Park R. (1990). Effect of Lateral Confining Reinforcement on the Ductile Behavior of Reinforced Concrete Columns. Report 90-2, Department of Civil Engineering, University of Canterbury.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği TBDY (2018). Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.

TS 500, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları (ICS 91.080.40), Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 2000.



Yapay Zekâ ile Kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) ve Karaçam (*Pinus nigra* Arnold.) Ağaçlarında Üst Boy Tahmini

Upper Height Prediction in Turkish Red Pine (*Pinus brutia* Ten.) and Black Pine (*Pinus nigra* Arnold.) with Artificial Intelligence

Emre Kuzugüdenli

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Yenişarbademli MYO, Ormancılık Bölümü, 32850 Isparta, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 31/12/2020

Kabul / Accepted: 11/03/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 23/05/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) ve karaçam (*Pinus nigra* Arnold.) Türkiye için ekonomik ve ekolojik olarak yüksek öneme sahip asli orman ağacı türleridir. Üst boy yetiştirme ortamının verimliliğini belirlemek için kullanılan önemli parametrelerden biridir. Gerçekleştirilen bu çalışmada karaçam ve kızılçam türünde üst boyun göğüs çapı ve ağaç yaşı parametreleriyle tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Bununla birlikte göğüs çapından ağaç boyu tahmininde sıklıkla kullanılan regresyon analizi ile bir tür yapay zekâ uygulaması olan Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemiyle elde edilen sonuçların kıyaslanması da hedeflenmektedir. YSA ile eğitilen ağın tahmini ile gerçek üst boy değerleri arasındaki ilişkiler incelendiğinde karaçama ait tahmin gücü en fazla olan model için R^2 değeri 0,58 olarak, kızılçama ait model için R^2 değeri 0,78 olarak belirlenmiştir. YSA ve regresyon modelleri karşılaştırıldığında kızılçama ait en iyi YSA modelinin başarısının ($R^2 = 0,78$) regresyon analizi ile tahmin edilen üst boy modelinin başarısına ($R^2 = 0,11$) göre daha başarılı olduğu görülmektedir. Benzer şekilde karaçama ait en iyi YSA modelinin başarısının ($R^2 = 0,58$) regresyon analizi ile tahmin edilen üst boy modelinin başarısına ($R^2 = 0,37$) göre daha başarılı olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler

“Yapay Sinir Ağları (YSA), Regresyon modeli, Üst boy tahmini, Kızılçam, Karaçam”

Abstract

Turkish red pine (*Pinus brutia* Ten.) and larch (*Pinus nigra* Arnold.) forests are essential tree species with high economic and ecological importance for Turkey. Upper height which is one of the important parameters used to determine the site productivity of forests. In this study, it was aimed to estimate the breast height diameter and tree age parameters in larch and Turkish red pine. In addition, it is aimed to compare the results obtained by the regression analysis, which is frequently used in estimating upper height from breast height diameter, and Artificial Neural Networks (ANN) method, which is a kind of artificial intelligence application. When the relationships between the estimation of the network trained with ANN and the real upper height values were examined, the R^2 value was determined as 0.58 for the model with the highest predictive power of the larch and the R^2 value for the Turkish red pine model as 0.78. When ANN and regression models are compared, it is seen that the success of the best ANN model of Turkish red pine ($R^2 = 0.78$) is more successful than the success of the upper height model estimated by regression analysis ($R^2 = 0.11$). Similarly, it is seen that the success of the best ANN model of larch ($R^2 = 0.58$) is more successful than the success of the upper height model ($R^2 = 0.37$) estimated by regression analysis.

Key Words

“Artificial Neural Networks (ANN), Regression model, Upper height estimation, Turkish red pine, Larch”

1. Giriş

Ormanların planlanması ve yönetilebilmesi için ormanların üretmiş oldukları üretim miktarının hesaplanması gerekir (Kalıpsız, 1994). Hesaplamalarda kullanılan göğüs çapı değişkeni ölçüm kolaylığı açısından oldukça pratiktir. Ağaç boyu değişkeni de çap gibi üretim hesaplamalarında kullanımıyla birlikte ekolojik çalışmaların önemli bir parametresi olan yetiştirme ortamı verim gücünün belirlenmesi içinde kullanılmaktadır. Ormancılık açısından önemli olan ağaç boyu parametresinin ölçümünün zaman alıcı olması ve hatalı ölçüm yapılabilmesinden dolayı ölçümü daha pratik ve doğru olan göğüs çapı ve yaş gibi değişkenler yardımı ile tahmin edilebilmektedir. Göğüs çapı ile ağaç boyu arasındaki ilişkinin ortaya koyulmasında regresyon modellerinden faydalanılmakta olup çeşitli yöre ve ağaç türleri için birçok regresyon modeli geliştirilmiştir (Saraçoğlu, 1988; Carus, 1998; Temesgen vd., 2007).

Gerçekleştirilen bu çalışmada ağaçlandırma çalışmalarında en çok kullanılan türlerden olan karaçam (*Pinus nigra* Arnold.) ve kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) tercih edilmiştir. Türkiye yaklaşık 23 milyon hektar orman alanına sahip olup bu alanın yaklaşık 13 milyon hektarı verimli, 10 milyon hektarı ise bozuk niteliktedir (OGM, 2020). Bozuk olan bu sahalar potansiyel ağaçlandırma sahaları olup buralarda kullanılacak ağaç türleri titizlikle seçilmelidir. Genel olarak düzensiz yağışların ve fakir toprakların olduğu alanlar erozyon tehlikesi yüksek alanlar olarak değerlendirilmektedir. Bu alanlarda gerçekleştirilecek ağaçlandırmalardaki başarı mevcut ekolojik koşullara adapte olabilen ve derin kök sistemine sahip türlerin kullanımıyla mümkündür. Çünkü derine inen köklerin toprağı daha iyi tuttuğu yüzeysel akışı azalttığı bilinmektedir (Turna vd., 2007). Bu özellikler dikkate alındığında kazık kök yapan ve kanaatkâr bir ağaç türü olan karaçamın karasal iklim bölgelerindeki ağaçlandırma alanları için önemli bir tür olduğu belirtilmektedir (Ürgeç, 1998).

Karaçam Türkiye’de karasal iklime en çok sokulabilen çam türü olup İç Anadolu, Ege, Akdeniz ve Marmara bölgesinin dağlık kesimleriyle Batı Karadeniz’de doğal olarak yayılışını yapar. 700m ile 1700m arasında orman kurar. Toprak istekleri bakımından da oldukça kanaatkâr bir tür olan karaçam, kış soğuklarına olduğu kadar yaz kuraklığına karşıda dayanıklıdır (Saatçioğlu, 1976). Karaçam bu kanaatkâr özelliklerinden dolayı karasal iklim koşullarına sahip ağaçlandırmalarda da başarıyı artırmak için sıklıkla tercih edilmektedir.

Türkiye için bir diğer önemli asli orman ağacı türü olan kızılçam Türkiye’de en geniş yayılışa sahip ağaç türüdür. Yayılışını genel olarak Akdeniz ikliminin hâkim olduğu alanlarda yapmaktadır. En yüksek rakımda ki yayılışını 1451 metrede yer alan Afyon-Çal Dağında yapan kızılçam (Genç vd., 1997), çoğu ağaç türüne göre hızlı büyümesi, kurak ve yarı kurak sahalarda yetişebilmesi ve kanaatkâr bir tür olması nedeniyle Akdeniz ikliminin etkisi altındaki alanlarda gerçekleştirilen ağaçlandırma çalışmalarında çoğunlukla tercih edilmektedir (Anonim, 2015).

Gerçekleştirilen bu çalışmada Türkiye ağaçlandırmalarında kullanılan önemli ağaç türlerinden karaçam ve kızılçamın üretim miktarlarının ve yetiştirme ortamı verim gücünün belirlenmesinde kullanılan üst boyun göğüs çapı ve ağaç yaşı parametreleriyle tahmin edilmesi amaçlanmıştır.

Ağaç türlerinin verimliliğiyle alakalı çalışmalar bakıldığında yöntem olarak regresyon analizinin temel analiz olarak kullanıldığı görülmektedir (Günlü vd., 2006; Özkan vd., 2008; Özkan ve Kuzugüdenli, 2010). Gerçekleştirilen bu çalışmada da literatürde ki yapılan çalışmaların modelleme yöntemlerine paralel olarak bu çalışmada regresyon analizi ile bir tür yapay zekâ uygulaması olan Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemiyle elde edilen sonuçların kıyaslanması da hedeflenmektedir. Ormancılıkla ilgili çalışmalarda sıklıkla kullanılan regresyon yöntemiyle (Yavuz, 1995) güvenilir tahminler elde edebilmek için bazı varsayımların bulunması gerekmektedir. Bu varsayımlar çoklu bağlantı ve otokorelasyon probleminin olmaması, verilerin normal dağılım göstermesi ve hata varyanslarının homojen olması şeklindedir (Orhunbilge, 2002).

Son yıllarda sıkça tercih edilen Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım (ANFIS), Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Bulanık Mantık gibi yapay zekâ uygulamaları araştırmacılar tarafından sıklıkla tercih edilmektedir (Çatal ve Saplıoğlu, 2018; Kuzugüdenli, 2018a; Kuzugüdenli, 2018b; Küçükerdem vd., 2019). Bu uygulamalardan varsayımların olmaması, tahmin başarısının yüksek olması ve birbirleriyle karmaşık ilişkilere sahip olan verilerin kolaylıkla modellenebilmesinden dolayı YSA araştırmada yöntem olarak tercih edilmiştir (Ashraf et al., 2013).

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Çalışmada, karaçam ve kızılçam meşcerelerinden alınan örnek alan verileri kullanılmıştır. Söz konusu karaçam meşcereleri Antalya Orman Bölge Müdürlüğü, Gazipaşa Orman İşletme Müdürlüğü sınırları içerisinde yer almaktadır. Bu meşcerelerden toplam 54 örnek alan alınmıştır. Kızılçam meşcereleri ise Konya Orman Bölge Müdürlüğü, Beyşehir Orman İşletme Müdürlüğü sınırları içerisinde yer almaktadır. Bu meşcerelerden toplam 30 örnek alan alınmıştır.

2.2. Metot

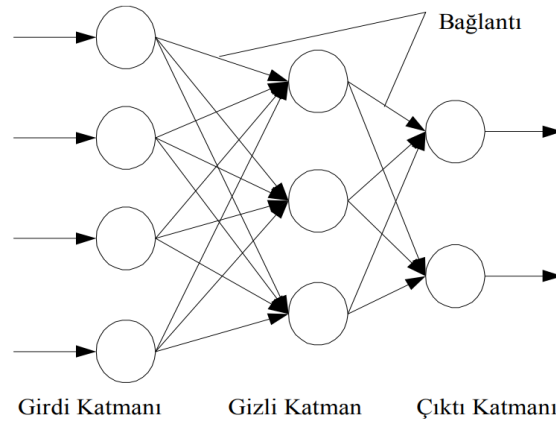
Kızılçam ve karaçam türlerine ait üst boy modelleri oluşturmak amacıyla farklı yetiştirme ortamını temsil eden toplam 84 örnek alan belirlenmiştir. Bu örnek alanlar aynı yaşlı, saf meşcerelerden bölgeyi temsil edecek şekilde seçilmiştir. Örnek alanlar 400m²

büyükliğünde kare olarak belirlenmiştir. Meşcere verimlilik ölçüsü olarak üst boy yetiştirme ortamı verim gücünü çap ve hacime göre daha iyi yansıtmasından ve meşcere sıklığından daha az etkilenmesinden dolayı tercih edilmektedir (Fırat, 1972). Her örnek alanda en fazla boya sahip 3 ağaç belirlenerek bu ağaçlarda artım burgusu ile yaş, kumpas ile göğüs çapı ve boy ölçer ile ağaç boyu ölçümleri yapılmıştır. Örnek ağaçlar seçilirken tepesi çatallaşmış, kırılmış ve gövde formu bozuk olmayan ağaçlar seçilmiştir.

84 örnek alandan toplam 252 adet çap-yaş-boy değişkenlerinden oluşan veri seti elde edilmiştir. Modellemelere başlamadan önce elde edilen verilerin normal dağılımına uygunluğu test edilmiştir. İstatistiki analizler IBM SPSS 22.0 paket programıyla gerçekleştirilmiştir.

Verilerin dağılımını belirlemek amacıyla basıklık- çarpıklık (skewness- kurtosis) değerlerinden faydalanılmıştır. Çarpıklık-basıklık değerleri normal dağılımın tespitinde araştırmacılar tarafından çokça tercih edilen yöntemlerden bir tanesidir (Saplıoğlu ve Acar, 2020). Çarpıklık-basıklık değerleri -1,5 ile +1,5 olduğu zaman normal dağılım olduğu kabul edilmektedir (Tabachnick and Fidell, 2013). Bu kurala göre normal dağılım denetimleri gerçekleştirilmiş olup denetimler sonrasında Regresyon ve Yapay Sinir Ağları modellemelerine geçilmiştir. Regresyon modellemeleri kapsamında doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Regresyon analizinde normal dağılım gösteren bağımsız değişkenden bağımlı değişken tahmin edilir. Yani regresyon analizi ile bağımsız değişken (x) ile bağımlı değişken (y) arasındaki ilişki incelenir. Bilimsel araştırmalarda yer alan ilişkileri açıklamak için çeşitli regresyon fonksiyonları geliştirilmiştir (Kalıpsız, 1994). Regresyon analizlerinde değişkenlerin dağılımları normal olmalıdır. İlişki katsayısı gibi regresyon katsayısı da pozitif veya negatif olabilir. İlişki katsayısı -1 ile +1 arasında değişirken, regresyon katsayısı her değeri alabilir (Pagano and Gauvreau, 1993).

Bir yapay zekâ uygulaması olan Yapay Sinir Ağları insan beyninin fonksiyonlarından esinlenerek geliştirilmiştir. YSA ile oluşturulan modeller nöronların (beyin hücresi) birbiri arasındaki iletişim prensibine dayanan bilgisayar programları ile elde edilmektedir (Elmas, 2003). YSA modeli birbirleri ile ilişkili olan sinirlerin bulunduğu 3 temel katmandan oluşmaktadır. Bu katmanlar giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanı şeklindedir (Şekil 1) (Chandwani et al., 2015).

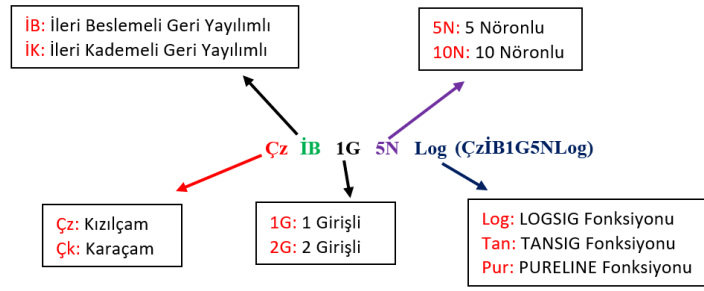


Şekil 1. Yapay sinir ağı katmanları (Örkcü, 2009)

Sinir ağı modelleri doğrusal olmayan ve çok karmaşık yapıdaki problemleri çözmedeki üstünlüğünden ve yeteneğinden dolayı çokça tercih edilmektedir. Araştırmacılar tarafından Hopfield, Elman, SOM, İleri Beslemeli Geri Yayılımlı ve İleri Kademeli Geri Yayılımlı ağlar gibi birçok sinir ağı modeli geliştirilmiştir. Bu ağ tiplerinden bazıları diğerlerinden daha fazla tercih edilmektedir (Elmas, 2003). Geri yayılım ağında hatalar, ileri besleme aktarma işlevinin türevi tarafından, ileri besleme mekanizması içinde kullanılan bağlantılar aracılığıyla geriye doğru yayılmaktadır (Chandwani vd., 2015). Yapay sinir ağlarında eğitim genellikle bir optimizasyon problemi olarak görülür. Özellikle yapay sinir ağlarında eğitimin amacı, ağıdaki ağırlıkları ayarlayarak hata değerini en aza indirmektir. Bu çalışmada da ormancılık çalışmalarında tercih edilen modellerden ileri beslemeli geri yayılımlı ve ileri kademeli geri yayılımlı ağ tipleri kullanılarak modellemeler gerçekleştirilmiştir (Özçelik vd., 2008; Ercanlı, 2018). Modeller, “Mathworks MATLAB” yazılımının R2020b versiyonu içinde yer alan Neural Network araç kutusu (nntool) ile oluşturulmuştur.

Gizli katmandaki nöron sayısının belirlenmesi ile ilgili kesin bir kural bulunmamakla birlikte literatürde gizli katmandaki nöron sayısının hesaplanması ile ilgili n girdi nöronu sayısını belirtmek üzere $2n+1$ ve $0,75n$ gibi tercihler sunulmaktadır (Lippmann, 1987; Bailey ve Thompson, 1990; Hamzaçebi, 2011). Bu çalışma kapsamında ise farklı alternatifler oluşturabilmek için gizli katmanda sabit nöron sayısı kullanmak yerine 5 ve 10 nöronlu 2 model alternatifi oluşturulmuştur.

Oluşturulan modeller 1 girdi ve 2 girdili olacak şekilde İleri Beslemeli-Geri Yayılımlı (Feed forward backprop) ve İleri Kademeli Geri Yayılımlı (Cascade forward backprop) iki farklı YSA tipi, 2 farklı nöron sayısı (5,10) ve 3 farklı dönüşüm fonksiyonu (Logsig, Purelin ve Tansig fonksiyonları) olmak üzere 48 kombinasyonlu (2x2x2x2x3) YSA yapısı ile ağ eğitimleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Yapay sinir ağı modellerine ait kısaltmalar

3. Bulgular

Çalışmanın değişkenleri olan göğüs yapısı, yaş ve üst boy değişkenlerine ait verileri regresyon analizine sokmadan önce verilerin dağılımı test edilmiştir. Verilerin normal dağılıp dağılmadığını belirlemek amacıyla çarpıklık (skewness)- basıklık (kurtosis) değerleri belirlenmiştir. Normalite testi sonucu incelendiğinde değişkenlere ait verilerin çarpıklık-basıklık değerlerinin -1,5 ile +1,5 arasında olduğu görülmekte olup verilerin normal dağılım gösterdiği tespit edilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Değişkenlere ait çarpıklık-basıklık değerleri

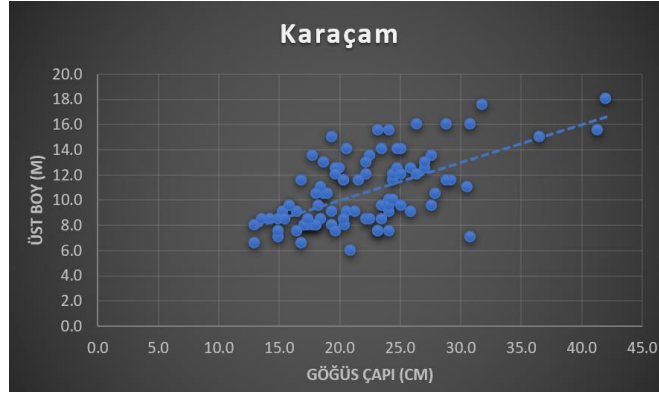
	Çarpıklık Değeri	Basıklık Değeri
Yaş	0,34	-0,56
Çap	0,76	1,49
Boy	0,8	-0,19

Dağılım testinden sonra karaçam ve kızılçam türleri için üst boy modellerini oluşturmak amacıyla önce basit regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Basit regresyon analizi göğüs çapı ve üst boy değişkenleri için üstel, doğrusal, logaritmik, polinomsal ve üssel olmak üzere 5 fonksiyona göre belirlenmiştir. Karaçam için gerçekleştirilen basit regresyon analizi sonucu en yüksek R² değeri 0,37 ile doğrusal fonksiyona ait olup fonksiyonlara ait R² değerleri ve denklemleri Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Karaçam türüne ait regresyon denklemleri ve belirtme katsayıları

Fonksiyon Adı	Denklem	R ²
Üstel	$y = 5,7204e^{0,0265x}$	0,33
Doğrusal	$y = 0,3006x + 3,9651$	0,37
Logaritmik	$y = 6,888\ln(x) - 10,513$	0,35
Polinomsal	$y = 0,0002x^2 + 0,2909x - 4,0786$	0,36
Üssel	$y = 1,5496x^{0,6166}$	0,34

Karaçama ait fonksiyonlar incelendiğinde doğrusal fonksiyona ait eğilim çizgisinin örnek noktaları temsil etme gücünün diğer fonksiyonlara göre daha yüksek olduğu Tablo 2’de görülmüş olup doğrusal fonksiyona ait noktaları temsil eden eğilim çizgisi Şekil 3’de görülmektedir.



Şekil 3. Karaçam türüne ait basit regresyon modeli

Kızılcım için gerçekleştirilen basit regresyon analizi sonucu en yüksek R^2 değeri 0,11 ile polinomsal fonksiyona ait olduğu belirlenmiştir. Ancak bu fonksiyonların belirtme katsayıları (üstel, doğrusal, logaritmik, polinomsal, üssel) incelendiğinde istatistiksel açıdan yüksek bir ilişkinin bulunmadığı görülmektedir (Tablo 3).

Tablo 3. Kızılcım türüne ait regresyon denklemleri ve katsayıları

Fonksiyon Adı	Denklem	R^2
Üstel	$y = 10.062e^{0.0102x}$	0,01
Doğrusal	$y = 0.1444x + 9.8708$	0,01
Logaritmik	$y = 5.5582\ln(x) - 4.6955$	0,01
Polinomsal	$y = -0.0171x^2 + 1.3368x - 10.127$	0,11
Üssel	$y = 3.7015x^{0.3839}$	0,01

Regresyon modelleri oluşturulduktan sonra YSA ile modelleme aşamasına geçilmiştir. YSA ile karaçam ve kızılçam için 1 girdi 1 çıktı ile 2 girdi 1 çıktı olmak üzere 2 model oluşturulmuştur. 1 girdili modelde girdi değişkeni göğüs çapı, 2 girdili modelde ise girdiler göğüs çapı ve yaş değişkeni olarak seçilmiştir. Çıktı değişkeni olarak üst boy belirlenmiştir. Karaçam için toplanan 90 adet veri setinden 70 adeti ağa eğitmek için 20 adeti ise ağa test etmek için kullanılmıştır. Kızılcım için toplanan 162 adet veri setinden 122 adeti ağa eğitmek için 40 adeti ise ağa test etmek için kullanılmıştır. Eğitim ve test için kullanılan veriler veri seti içerisinde rastgele seçilmiştir. Yapay sinir ağları ile modellemeye başlamadan önce veri seti normalize edilmiştir. Çünkü YSA verilerine uygulanan bazı normalizasyon metodları ile yapay sinir ağları performansı ve doğruluğunun iyileştireceği literatürde belirtilmektedir (Masters, 1993). Araştırmacılar tarafından ağın performansını ve doğruluğunu artıran çeşitli normalizasyon metodları kullanmakta olup çoğunlukla D_Min_Max metodu tercih edilmektedir (Denklem 1). D_Min_Max normalizasyonu ile veriler 0 - 1 aralığında ölçeklendirilerek aşırı büyük ve küçük olan verilerin modele olan olumsuz etkileri azaltılmaktadır (Öztemel, 2003).

$$x_{norm} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (\text{Denklem 1})$$

x_{norm} = Normalize edilmiş veri,

x_i = Girdi değeri

x_{min} = Girdi seti içerisinde yer alan en küçük sayı

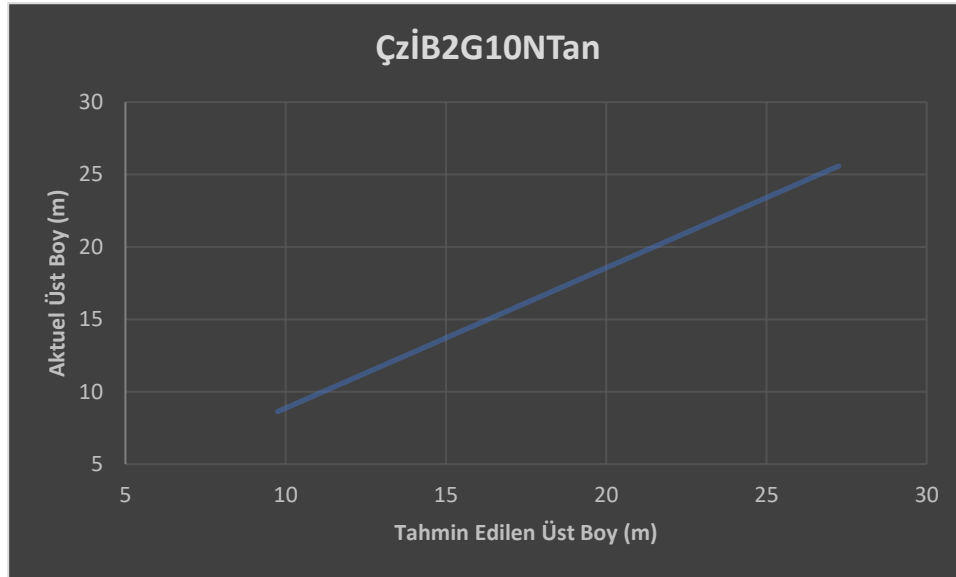
x_{max} = Girdi seti içerisinde yer alan en büyük sayı

Karaçam için eğitilen ağa test için ayrılan ve ağa daha önce tanıtılmayan 20 adet test veri seti, kızılçam için eğitilen ağa test için ayrılan ve ağa daha önce tanıtılmayan 40 adet test veri seti girilerek üst boy tahmini gerçekleştirilmiştir. Karaçama ait en yüksek tahmin başarısı ÇkİB2G10NLog modeline ait olup modele ait belirtme katsayısı 0,58 olarak belirlenmiştir. Tahmine ait hatalardan ortalama mutlak hata (MAD) değeri 0,88 olarak, Ortalama karesel hata değeri (MSE) 1,89 olarak, Kök ortalama karesel hatası (RMSE) 1,37 olarak ve Ortalama mutlak yüzdesel hata (MAPE) 9,63 olarak belirlenmiştir. Kızılcıma ait en yüksek tahmin başarısı ÇzİB2G10NTan modeline ait olup modele ait belirtme katsayısı 0,78 olarak belirlenmiştir. Tahmine ait hatalardan ortalama mutlak hata (MAD) değeri 0,5 olarak, Ortalama karesel hata değeri (MSE) 0,78 olarak, Kök ortalama karesel hatası (RMSE) 0,88 olarak ve Ortalama mutlak yüzdesel hata (MAPE) 5,93 olarak belirlenmiştir (Tablo 4).

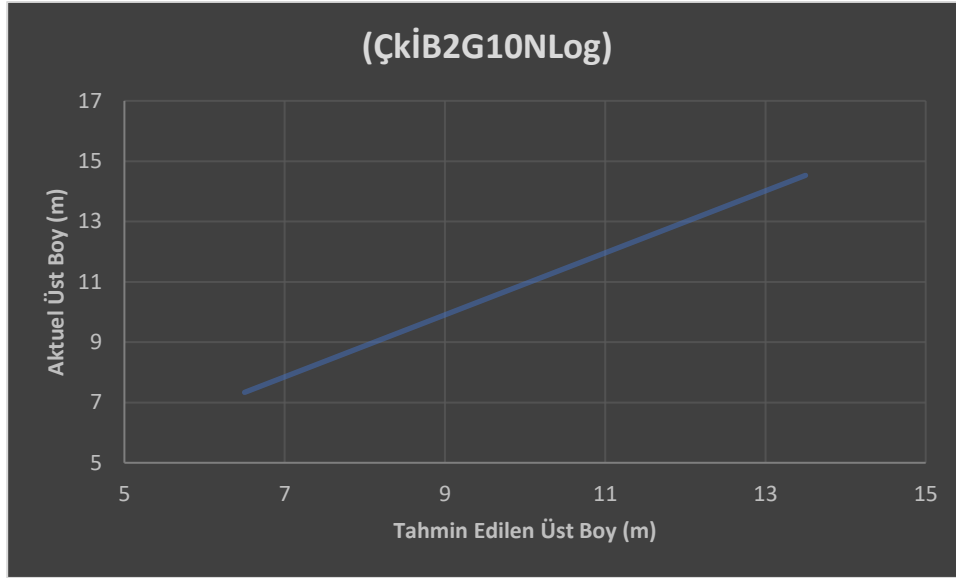
Tablo 4. YSA tahmin modellerine ilişkin belirtme katsayısı ve hata değerleri

MODEL	R ²	MAD	MSE	RMSE	MAPE	MODEL	R ²	MAD	MSE	RMSE	MAPE
ÇziB1G5NLog	0,14	1,71	4,80	2,18	19,04	ÇkİB1G5NLog	0,08	1,84	6,47	2,53	20,66
ÇziB2G5NLog	0,4	1,27	2,44	1,56	13,78	ÇkİB2G5NLog	0,45	1,22	2,34	1,52	13,34
ÇziB1G5NTan	0,11	1,68	4,33	2,07	17,33	ÇkİB1G5NTan	0,11	4,31	36,51	6,02	45,47
ÇziB2G5NTan	0,44	1,42	4,98	2,23	14,98	ÇkİB2G5NTan	0,38	1,32	2,54	1,59	14,44
ÇziB1G5NPur	0,12	4,17	36,14	5,99	43,94	ÇkİB1G5NPur	0,1	1,75	5,98	2,44	19,71
ÇziB2G5NPur	0,59	0,87	1,78	1,33	9,85	ÇkİB2G5NPur	0,47	1,37	4,88	2,21	14,54
ÇziB1G10NLog	0,14	1,54	5,35	2,30	17,16	ÇkİB1G10NLog	0,24	2,87	12,78	3,57	31,10
ÇziB2G10NLog	0,61	0,82	1,78	1,33	9,19	ÇkİB2G10NLog	0,58	0,88	1,89	1,37	9,63
ÇziB1G10NTan	0,22	1,48	8,48	2,90	16,29	ÇkİB1G10NTan	0,3	2,17	8,83	2,97	23,29
ÇziB2G10NTan	0,78	0,5	0,78	0,88	5,93	ÇkİB2G10NTan	0,51	0,97	2,13	1,45	10,47
ÇziB1G10NPur	0,3	2,12	8,43	2,90	22,85	ÇkİB1G10NPur	0,31	2,12	8,88	2,98	22,59
ÇziB2G10NPur	0,53	1,12	2,04	1,42	12,20	ÇkİB2G10NPur	0,15	3,87	34,33	5,84	40,18
ÇziK1G5NLog	0,17	2,52	11,33	3,36	27,94	ÇkİK1G5NLog	0,19	1,58	4,39	2,09	17,48
ÇziK2G5NLog	0,39	1,22	2,94	1,71	13,15	ÇkİK2G5NLog	0,43	1,17	2,95	1,71	12,11
ÇziK1G5NTan	0,31	1,62	6,98	2,64	17,48	ÇkİK1G5NTan	0,16	3,82	34,28	5,83	39,55
ÇziK2G5NTan	0,64	0,77	1,58	1,25	8,60	ÇkİK2G5NTan	0,45	1,02	2,33	1,52	10,78
ÇziK1G5NPur	0,18	2,72	12,33	3,51	29,85	ÇkİK1G5NPur	0,2	2,37	10,68	3,26	25,98
ÇziK2G5NPur	0,49	1,32	4,78	2,18	13,77	ÇkİK2G5NPur	0,43	1,07	2,43	1,55	11,21
ÇziK1G10NLog	0,34	1,97	8,28	2,87	20,83	ÇkİK1G10NLog	0,32	2,07	8,63	2,93	22,04
ÇziK2G10NLog	0,7	0,57	1,13	1,06	6,55	ÇkİK2G10NLog	0,49	1,17	2,14	1,46	12,57
ÇziK1G10NTan	0,35	1,77	7,43	2,72	18,73	ÇkİK1G10NTan	0,28	3,02	13,38	3,65	32,4
ÇziK2G10NTan	0,62	1,02	2,98	1,72	10,44	ÇkİK2G10NTan	0,57	0,89	1,9	1,38	9,65
ÇziK1G10NPur	0,2	1,59	8,69	2,94	17,55	ÇkİK1G10NPur	0,36	1,82	7,83	2,79	19,16
ÇziK2G10NPur	0,67	0,82	1,98	1,40	8,53	ÇkİK2G10NPur	0,54	0,92	1,987	1,40	10,06

Sonuçları görselleştirebilmek amacıyla, kızılcama ait aktüel üst boy verileri ile en yüksek tahmin başarısına sahip YSA modelinin (**ÇziB2G10NTan**) ürettiği üst boy verileri ortak bir grafik üzerinde Şekil 4' te sunulmuştur.

**Şekil 5.** Kızılcama ait en iyi YSA tahmin modeli

Benzer şekilde karaçama ait aktüel üst boy verileri ile en yüksek tahmin başarısına sahip YSA modelinin (**ÇkİB2G10NLog**) ürettiği üst boy verileri ortak bir grafik üzerinde Şekil 5' te sunulmuştur.



Şekil 6. Karaçama ait en iyi YSA tahmin modeli

4. Tartışma ve Sonuç

Gerçekleştirilen bu çalışmada karaçam ve kızılçam türünde üst boyun göğüs çapı ve ağaç yaşı parametreleriyle tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Göğüs çapından ağaç boyu tahmininde sıklıkla kullanılan regresyon analizi ile bir tür yapay zekâ uygulaması olan Yapay Sinir Ağları yöntemiyle elde edilen sonuçların kıyaslanması da hedeflenmiştir. Karaçam ve kızılçam türleri için 5 farklı fonksiyona göre (üstel, doğrusal, logaritmik, polinomsal ve üssel) gerçekleştirilen basit regresyon analizi sonucu kızılçam türünde istatistiksel açıdan herhangi bir ilişki belirlenememiş olup karaçam içinse en yüksek R^2 değeri 0,37 ile doğrusal regresyon fonksiyonuna ait olarak belirlenmiştir.

Yapay Sinir Ağı modeli oluşturmak amacıyla önce ağ eğitilmiştir. Ağ eğitiminde toplam 48 farklı kombinasyon oluşturulmuştur. Bu kombinasyonlar farklı ağ tipleri (İleri beslemeli geri yayımlı ve İleri kademeli geri yayımlı), farklı girdi sayısı (1 ve 2 girdi), farklı dönüşüm fonksiyonu (Logsig, Purelin ve Tansig fonksiyonları), farklı gizli katman nöron sayısı (5 ve 10 nöron) ve farklı ağaç tipi (Kızılçam ve Karaçam) ile oluşturulmuştur. Kızılçam için oluşturulan YSA modelleri incelendiğinde en yüksek tahmin başarısına sahip modelin **ÇzİB2G10NTan** (R^2 değeri 0,78) belirlenmiştir. Karaçam için oluşturulan YSA modelleri incelendiğinde en yüksek tahmin başarısına sahip modelin **ÇkİB2G10NLog** (R^2 değeri 0,58) belirlenmiştir. Bu modellerin tahmin hatalarına bakıldığında ortalama mutlak hata (MAD) değeri, ortalama karesel hata değeri (MSE), kök ortalama karesel hatası ve ortalama mutlak yüzdesel hata (MAPE) değerlerinin diğer modellere kıyasla en az hataya sahip olduğu görülmektedir (Tablo 4). Bilindiği gibi, tahmin hatası ile tahmin doğruluğu ters orantılıdır, yani tahmin hatası küçüldükçe modelin doğruluk derecesi artmaktadır. Bu nedenle, farklı tahmin modellerini karşılaştırırken en küçük hata değerine sahip model en iyi model olarak seçilmektedir. Hem belirtme katsayısı hem de tahmin hatalarına bakıldığında kızılçam için **ÇzİB2G10NTan** modelini karaçam içinse **ÇkİB2G10NLog** modelinin en başarılı model olduğunu ortaya koymuştur. Regresyon analizi oluşturulan modeller ile YSA ile oluşturulan modellerin tahmin başarısı kıyaslandığında da YSA modellerinin regresyon modellerinden daha başarılı olduğu görülmektedir. Diamantopoulou ve Özçelik (2012), ağaç boylarını tahmin eden modeller geliştirmişler ve gerçekleştirdikleri çalışmalarında bu çalışmaya benzer şekilde YSA modellerinin regresyon modellerine göre daha başarılı olduğunu tespit etmişlerdir. Ercanlı ve arkadaşları (2016) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada da Doğu Karadeniz bölgesinde yetişen doğu ladini-sarıçam karışık meşcerelerinden elde edilen bazı verilerle çap artımları modellenmiştir. Modellemelerde regresyon ve YSA modelleri kullanılmış olup en yüksek tahmin gücünün YSA ile elde edilen modellerde olduğu tespit edilmiştir. Günlü ve Ercanlı (2017) tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada da Doğu kayını meşcerelerinin karbon depolama miktarları regresyon ve YSA ile belirlenmeye çalışılmıştır. Araştırma sonucunda YSA modellerinin karbon depolama tahminlerindeki başarısının regresyon modellerine göre daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Literatür incelendiğinde de YSA modellerinin başarılı sonuçlar verdiği birçok araştırma da mevcuttur (Özçelik vd., 2008; Leite vd., 2011; Diamantopoulou ve Özçelik, 2012).

YSA'nın daha başarılı olması karmaşık ilişkileri daha iyi açıklamasından kaynaklanmaktadır. Girdi sayısı, gizli katmandaki nöron sayısı, YSA tipi ve transfer fonksiyonu gibi parametreler YSA'nın bu karmaşık ilişkileri açıklamasındaki önemli faktörlerdendir. Gerçekleştirilen bu çalışmada da YSA modellerinin tahmin başarısının girdi sayısına göre arttığı tespit edilmiştir. Nitekim ormancılık alanında YSA ile gerçekleştirilen çalışmalara bakıldığında da bu durum görülebilmektedir. Bolat (2015) tarafından ağaçlara ait 6 değişken girdi olarak kullanılarak ağaç boyu tahmin edilmiştir. Çalışmada ağ İleri Beslemeli-Geri Yayımlı YSA ile eğitilmiş ve başarılı bir tahmin modeli oluşturulmuştur ($R^2 = 0,87$). Özdemir (2018) tarafından Kayın-Gökmar karışık meşcerelerinin çaplarının tahmini için

gerçekleştirilen bir çalışmada 3 girdiyle bir YSA modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan bu model diğer modellere göre en iyi sonucu vermiştir. Şenyurt ve arkadaşları (2015) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada 3 girdi (yaş, bonitet endeksi ve hacim) bazı meşcere özellikleri İleri Beslemeli-Geri Yayılımlı YSA modeli ile yöntemi ile başarılı bir şekilde tahmin edilmiştir.

YSA tipleri de modelin başarısında etkili bir diğer faktördür. Çalışmada kullanılan YSA modelleri geri yayılımlı (ileri beslemeli geri yayılımlı ve ileri kademeli geri yayılımlı) ağ tipine sahiptir. Konuyla ilgili literatüre bakıldığında da geri yayılımlı ağların öğrenme ve tahmin başarılarının yüksek olduğu görülmektedir. Özçelik ve arkadaşları (2013), gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarında karaçam ağaçlarının boylarının tahmin edilmesinde en doğru ve başarılı tahminleri geri yayılımlı YSA modelleri ile elde etmişlerdir.

Geri beslemeli ağın başarılı olduğu bir diğer çalışmada Ercanlı ve Bolat (2017) tarafından Samsun yöresindeki çam ağaçlarının çap dağılımlarının YSA ile modellenmesine ilişkin gerçekleştirilmiş olup elde edilen modellere bakıldığında da tahmin gücü en yüksek olan modelin ileri beslemeli geri yayılımlı YSA modeli olduğu görülmektedir.

Bununla birlikte gizli katmandaki nöron sayısı da modelin tahmin başarısını etkileyen önemli bir diğer faktördür. Modeller incelendiğinde 10 nöronlu modellerin 5 nöronlu modellere göre daha yüksek tahmin başarısına ve daha düşük tahmin hatasına sahip olduğu görülmektedir (Tablo 4). Nitekim Özdemir (2018) tarafından gövde çaplarının YSA ile tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı bir çalışmada YSA modellerinde nöron sayısının 6'dan az olmaması gerektiği ifade edilmiştir.

5. Öneriler

YSA, mühendislik uygulamalarında çok faydalı bir araç olabilmekte ve özellikle de regresyon modelleri ile düşük tahmin başarısı elde edilen veri modellemelerinde güçlü bir araç olarak karşımıza çıkmaktadır. Tahmin başarısının düşük olduğu regresyon modellemelerine göre güçlü bir alternatif olan YSA, karmaşık ilişkileri başarıyla modelleyebilmesi ve diğer istatistikî metotlardaki gibi varsayım şartlarının olmaması nedeniyle tercih sebebi olmaktadır.

Yetiştirme ortamının verimliliğinin göstergelerinden birisi olan üst boy orman ekolojisi alanında yer alan önemli değişkenlerden bir tanesidir. Üst boy ile yetiştirme ortamının verim gücü belirlenerek yetiştirme ortamı sınıflandırılması yapılabilir. Bu çalışmada ağaç boyu ölçümünün zor ve zaman alıcı olması ayrıca hatalı ölçümlerin yapılabilmesinden dolayı ölçümü daha kolay olan çap ile üst boyun tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma sonucunda karaçam türünün tahmin başarısı ($r^2=0,58$) olarak elde edilmiştir. Tahmin başarısının yüksek olmamasından dolayı Konya Orman Bölge Müdürlüğü içinde yer alan karaçamlar için çap değişkeninin kullanılması önerilmemektedir. Bununla birlikte kızılçam türünün tahmin başarısının yüksek olması ($r^2=0,78$) Antalya Orman Bölge Müdürlüğü içinde çap değişkeninin kullanılmasına olanak vermektedir.

Çalışma sonucunda YSA modellerinin klasik yöntemlerden olan regresyon yöntemlerinden daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir. Bundan sonra konuyla ilgili gerçekleştirilecek çalışmalarda farklı meşcerelerde çalışmaya dahil ederek veri sayısının ve girdi sayısının artırılmasının YSA'nın tahmin başarısını artıracığı düşünülmektedir.

Referanslar

Alshihri, M. M., Azmy, A. M., & El-Bisy, M. S. (2009). Neural Networks for Predicting Compressive Strength of Structural Light Weight Concrete. *Construction and Building Materials*, 23, 2214–2219.

Anonim, (2015). Türkiye Orman Varlığı. Orman Genel Müdürlüğü Yayınları, 33 s., Ankara.

Bailey, D., & Thompson, D. M. (1990). Developing neural-network applications. *AI Expert*, 5(9), 33-41.

Bolat, F. (2015). Predictions for Oriental beech tree heights based on artificial neural network in Kestel forests. In *The 10th International Beech Symposium* (pp. 1-6).

Carus, S. (1998). Aynı yaşlı Doğu kayını (*Fagus orientalis* Lipsky.) ormanlarında artım ve büyüme. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 359 s, İstanbul.

Chandwani, V., Agrawal, V., & Nagar, R. (2015). Modeling Slump of Ready Mix Concrete Using Genetic Algorithms Assisted Training of Artificial Neural Networks. *Expert Systems with Applications*, 42, 885–893.

Çatal, Y., & Saphioğlu, K. (2018). Comparison of adaptive neuro-fuzzy inference system, artificial neural networks and non-linear regression for bark volume estimation in brutian pine (*Pinus brutia* Ten.). *Applied ecology and environmental research*, 16(2), 2015-2027.

- Diamantopoulou, M. J., & Özçelik, R. (2012). Evaluation of different modeling approaches for total tree-height estimation in Mediterranean Region of Turkey. *Forest Systems*, 21(3), 383-397.
- Elmas, Ç. (2003). *Yapay Sinir Ağları (Kuram, Mimari, Eğitim, Uygulama)*. Seçkin Yayınevi, Ankara, 192s.
- Ercanlı, İ., & Bolat, F. (2017). Diameter distribution modeling based on artificial neural networks for Kunduz forests, *International Symposium on New Horizons in Forestry*, 238-241, Isparta.
- Ercanlı, İ. (2018). Tarsus Yöresi Anadolu Karaçamı Ağaçlarında Hacim Tahminlerinin Yapay Sinir Ağları ile Elde Edilmesi. *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi*, 4(1), 25-37.
- Fırat, M. (2002). Doğrusal ve Kıvrımlı Akarsulara Yerleştirilen Köprü Ayakları Etrafında Meydana Gelen Oyulma Derinliğinin Yapay Sinir Ağları ile Belirlenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 125 s.
- Genç, M., Güner Ş. T., & Fakir, H. (1997). Afyon-Çal Dağı Kızılcım Meşcereleri. *Orman Mühendisliği Dergisi*. 34(6); 7-14.
- Günlü, A., Yılmaz, M., Altun, L., Ercalı, İ., & Küçük, M., 2006. Artvin Genya Dağı bölgesinde saf doğu ladini (*Picea orientalis* (L) Link.) meşcerelerinin verimliliği ile bazı edafik ve fizyografik faktörler arasındaki ilişkiler. *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 1: 1-10.
- Günlü, A., & Ercanlı, İ. (2017). Evaluating some artificial neural networks and multiple linear regression model for predicting carbon of pure Oriental beech stand in Göldağı forests, *International Symposium on New Horizons in Forestry*, 257-259, Isparta.
- Hamzaçebi, C. (2011). *Yapay sinir ağları tahmin amaçlı kullanımı Matlab ve Neurosolutions uygulamalı*. Bursa: Ekin Basım Yayın Dağıtım.
- Kalpızsız, A. (1994). *İstatistik yöntemler*. İÜ Orman Fakültesi.
- Kuzugüdenli, E. (2018a). Bulanık mantık yöntemiyle kızılçamda verimliliğin modellenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(3), 426-434.
- Kuzugüdenli, E. (2018b). Relative humidity modeling with artificial neural networks. *Applied Ecology and Environmental Research*, 16(4), 5227-5235.
- Küçükerdem, T. S., Kilit, M., & Saphioğlu, K. (2019). Bulanık çıkarım sistemlerinde kullanılan küme sayılarının K-ortalamlar ile belirlenmesi ve baraj hacmi modellenmesi: Kestel barajı örneği. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(8), 962-967.
- Leite, H. G., da Silva, M. L. M., Binoti, D. H. B., Fardin, L., & Takizawa, F. H. (2011). Estimation of inside-bark diameter and heartwood diameter for *Tectona grandis* Linn. trees using artificial neural networks. *European Journal of Forest and Research*, 130(2), 263-269.
- Lippmann, R. P. (1987). An introduction to computing with neural nets. *IEEE Assp Magazine*, 4(2), 4-22.
- Masters, T. (1993). *Practical neural network recipes in C++*. Morgan Kaufmann.
- OGM (Orman Genel Müdürlüğü), "İstatistikler", Erişim: 20 Ağustos 2020. <https://www.ogm.gov.tr/ekutuphane>
- Orhunbilge, N. (2002). *Uygulamalı Regresyon ve Korelasyon Analizi*, İ.Ü. İşletme Fakültesi Yayınları, II. Baskı İstanbul
- Örkcü, H.H. (2009). *Ayırma analizine matematiksel programlama ve yapay sinir ağları yaklaşımları*. Yayınlanmış doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Özçelik, R., Diamantopoulou, M. J., Wiant, H.V., & Brooks, J. R. (2008). Comparative study of standard and modern methods for estimating tree bole volume of three species in Turkey. *Forest Products Journal*, 58(6), 73-81.
- Özdemir, G. (2018). *Karabük Yöresi Kayın-Gökmar Karışık Meşcerelerinde Gövde Çaplarının Yapay Sinir Ağları ile Tahmin Edilmesi (Doctoral dissertation, Kastamonu Üniversitesi)*.
- Özkan, K., & Kuzugüdenli, E. (2010). Akdeniz Bölgesi Sütçüler Yöresinde kızılçamın (*Pinus brutia* Ten.) verimliliği ile yetiştirme ortamı özellikleri arasındaki ilişkiler. *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi Seri: A, (1)*, 16-29.

- Özkan, K., Gulsoy, S., & Mert, A., (2008). Interrelations between height growth and site characteristics of *Pinus nigra* Arn. ssp. *pallasiana* (Lamb.) Holmboe. *J. The Malaysian Forester*, 71: 9-16.
- Öztemel, E. (2003), *Yapay Sinir Ağları, Birinci Baskı, İstanbul: Papatya Yayıncılık.*
- Pagano M, Gauvreau K. (1993) *Simple Linear Regression. Principles of Biostatistics . Duxbury Press, USA, 379-424.*
- Saatçioğlu, F. (1976). *Silvikültür I, Silvikültürün Biyolojik Esasları ve Prensipleri, İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları, Yayın No: 2187/222, İstanbul.*
- Saplıoğlu, K., & Acar, R. (2020). K-Means Kümeleme Algoritması Kullanılarak Oluşturulan Yapay Zekâ Modelleri ile Sediment Taşınımının Tespiti. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), 306-322.
- Saraçoğlu, Ö. (1988). *Karadeniz Yöresi Göknaar Meşçerelerinde Artım ve Büyüme. Orman Genel Müdürlüğü Yayınları, 312 s, İstanbul.*
- Şenyurt, M., Ercanlı, İ., & Yavuz, H. (2015) Kahrıman, A., Predicting stand yield parameters based on artificial neural network for oriental beech in kestel forests, Bursa, The 10th International Beech Symposium, 1-6 September, 2015, Kastamonu, Safranbolu/Türkiye
- Temesgen, H., Hann, D.W., & Monleon, V.J. (2007). Regional height-diameter equations for major tree species of Southwest Oregon. *Western Journal of Applied Forestry*. 22(3): 213-219
- Turna, İ., Altun, L., Üçler, A.Ö., & Tazegün, T. (2007). Kurak ve Yarı kurak Bölge Ağaçlandırmalarının Genel Değerlendirmesi. *Türkiye’de Yarı Kurak Bölgelerde Yapılan Ağaçlandırma ve Erozyon Kontrolü Uygulamalarının Değerlendirilmesi Çalıştayı. 7-10 Kasım 2006, Ürgüp-Türkiye, 33-42.*
- Ürgenç, S. (1998). *Ağaçlandırma Tekniği. İ.Ü Orman Fakültesi, İ.Ü Rektörlük Yayın No: 3994, Orman Fakültesi Yayın No: 441, Emek Matbaacılık, İstanbul. 600 s.*
- Yavuz, H. (1995). Uyumlu ve uyumsuz gövde çapı modelleri. *KTÜ Orman Fakültesi Bahar yarıyılı seminerleri, Fakülte Yayın No:49, 101-106*



Birden Fazla Boşluklu Çift Doğrultulu Betonarme Döşemelerin Zımbalama Performansının İyileştirilmesi için Tekstil ile Güçlendirilmiş Sıva Şeritler ile Güçlendirilmesi

Improving Punching Behavior of RC Two Way Slab with Multiple Openings Strengthened by using Textile Reinforced Mortar Strip

Ömer Mercimek^{1*}, Rahim Ghoroubi², Özgür Anıl³, Mehmet Baran⁴

¹Araştırma Görevlisi, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06010, Ankara, TÜRKİYE

²Öğretim Görevlisi Dr., Çankaya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06790, Ankara, TÜRKİYE

³Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara, TÜRKİYE

⁴Doç.Dr., Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06010, Ankara, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 02/03/2021

Kabul / Accepted: 11/04/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 23/05/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Betonarme kirişsiz döşemelerde meydana gelebilecek olan ani ve gevrek bir şekilde, hiçbir deformasyon belirtisi göstermeden oluşan zımbalama göçme mekanizması yapı içerisinde yaşayanlara zarar verebilecek son derece tehlikeli bir göçme şeklidir. Bu nedenle tasarım aşamasında kaçınılan göçme mekanizmalarının başında gelmektedir. Betonarme döşemelerde farklı nedenlerden dolayı bırakılan boşlukların, döşemelerin zımbalama dayanımını ve davranışını olumsuz etkilediği bilinmektedir. Bu nedenle betonarme çift doğrultulu döşemelerde birden fazla boşluğun döşemelerin zımbalama davranışı üzerindeki olumsuz etkilerinin belirlenmesi ve boşlukların meydana getirdiği davranış problemlerinin azaltılabilmesi için tekstil ile takviye edilmiş sıva şeritler ile döşemelerin güçlendirilmesinin incelendiği deneysel bir çalışma planlanmıştır. Bu çalışma kapsamında biri boşluksuz referans elemanı, 4 deney elemanı ise 300x300 mm boyutlarında kare kesitli iki adet boşluklu olacak şekilde toplamda 5 döşeme deney elemanı üretilmiştir. Boşluklu deney elemanlarının ikisi tekstil ile güçlendirilmiş sıva katmanlı (TGSK) şeritler ile güçlendirilerek deney elemanlarının zımbalama davranışı üzerinde boşlukların meydana getirdiği olumsuz etkilerin ne ölçüde iyileştirilebildiği deneysel olarak araştırılmıştır. Deney elemanlarının güçlendirilmesi sırasında çift doğrultulu karbon tekstil (hasır şeklinde) kullanılmıştır. Çalışma kapsamında TGSK şeritler ile geliştirilen ve uygulanan güçlendirme metodunun döşemelerin zımbalama dayanımını önemli ölçüde artırdığı, boşlukların meydana getirdiği olumsuz etkileri sınırlandırdığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

“Çift doğrultulu betonarme döşeme, Birden fazla boşluk, Zımbalama, Tekstil ile güçlendirilmiş sıva”

Abstract

The punching collapse mechanism, which can occur in slabs without reinforced concrete beams in a sudden and brittle way, without showing any signs of deformation, is an extremely dangerous form of collapse that can harm the inhabitants of the building. For this reason, it is one of the most avoided failure mechanisms during the design phase. It is known that the openings left in reinforced concrete slabs, negatively affect the punching strength and behavior of the slabs. For this reason, an experimental study was planned to determine the negative effects of more than one opening on the punching behavior of the reinforced concrete two-way slabs and to reduce the problems caused by the openings, examining the strengthening of the slabs with textile reinforced mortar strips. Within the scope of this study, a total of 5 slab test specimens were produced, one of which is a reference specimen without opening and four of them are 300x300 mm opening with square cross-section. To what extent the negative effects caused by the openings on the punching behavior of the test specimens could be improved by strengthening two of the opening test specimens with textile reinforced mortar strip (TRM) was investigated experimentally. During the strengthening of the specimens, bidirectional carbon textile was used. Within the scope of the study, it was observed that the strengthening method developed and applied with TRM strips significantly increased the punching strength of the slabs and limited the negative effects caused by the openings.

Key Words

“Two way RC slab, Multiple opening, Punching, Textile reinforced mortar”

1. Giriş

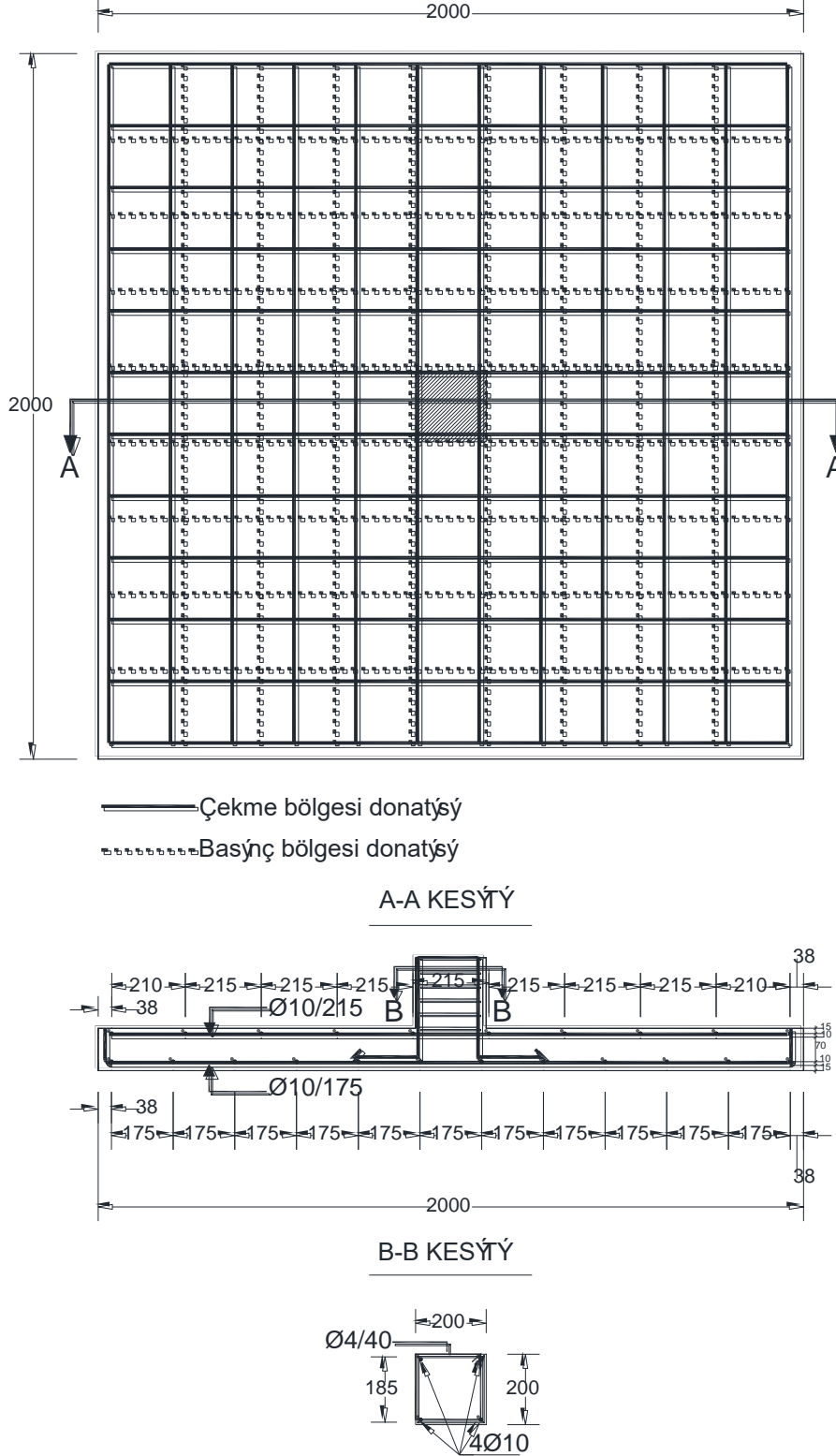
Deprem tehlikesinin yüksek olduğu coğrafyalarda deprem performansı düşük çok sayıdaki yapının güçlendirilmesi gerekliliği, söz konusu yapıların kısa sürede, içeride yaşayan insanları minimum düzeyde rahatsız ederek, düşük maliyetli ve çok yüksek düzeyde uzmanlık gerektirmeyecek bir işçilik ile güçlendirilme çalışmalarının yapılması ihtiyacını da ortaya çıkarmıştır. Yürütülen çalışmalar bu özellikleri taşıyan güçlendirme detaylarının geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmış ve çok daha kısa sürede, basit bir şekilde kolay uygulanabilecek ve ekonomik malzemelerin kullanıldığı güçlendirme detaylarının geliştirilmesi konusundaki araştırmalar artış göstermiştir. Son 20 yıldır lif takviyeli polimer (FRP) ile güçlendirme yaygın bir şekilde kullanılmış ve birçok yapı bu teknik ile güçlendirilmiştir. Ayrıca, konu ile ilgili birçok bilimsel çalışma yapılmış ve güçlendirme-onarım çalışmalarında FRP en çok tercih edilen malzemelerden biri haline gelmiştir (Gemi ve diğerleri, 2019, 2020; Aksoylu ve diğerleri, 2020; Mercimek ve diğerleri, 2020, 2021; Özkılıç ve diğerleri, 2021; Ghoroubi ve diğerleri, 2020, 2021; İşleyen ve diğerleri, 2021). Buna rağmen, tekstil ile güçlendirilmiş çimento esaslı malzemelerin yapısal güçlendirme alanında kullanımı son 10 yıl içerisinde artış göstererek yapı sistemi ve elemanlarının güçlendirme ve onarım çalışmalarında bu tür malzemeler de kullanılmaya başlanmıştır. Tekstil örgü ağların sıva katmanı arasında bir güçlendirme detayı olarak kullanılması diğer kompozit malzemelerin özel yapıstırcılar ile güçlendirme amacıyla kullanılmasına göre çok daha ekonomik olması, çevre dostu bir seçenek olması, taşıyıcı özelliğinin yüksekliği gibi nedenlerden tercih edilen bir seçenek haline gelmiştir. Bu nedenle çalışması kapsamında tekstil ile güçlendirilmiş sıva katmanı (TGSK) eklenmesi tekniğinin birden fazla boşluklu betonarme döşemelerin zımbalama davranışının iyileştirilmesinde kullanılması amaçlanmıştır.

TGSK ile güçlendirme yöntemi betonarme döşemelere de uygulanmış ve olumlu sonuçlar alınmış olduğu yapılan literatür taraması sonucunda görülmüştür. Ancak betonarme döşemelerin TGSK ile güçlendirilmesine ait çalışmaların sayısı yığma yapı elemanlarına, betonarme kiriş ve kolonlara kıyasla çok daha azdır. Jesse ve diğerleri (2008) ve Papanicolaou ve diğerleri (2009) tarafından yürütülen çalışmalar bu konudaki ilk çalışmalardır. Bu çalışmaların devamında Schladitz ve diğerleri (2012) tarafından yürütülen deneysel ve teorik çalışmada TGSK (karbon bazlı) ile güçlendirilmiş tek doğrultulu betonarme döşemelerin eğilme taşıma kapasiteleri araştırılmıştır. Schladitz ve diğerlerinin (2012) çalışmasına benzer bir çalışma da Zwicky (2013) tarafından gerçekleştirilmiştir. Zwicky, diğer çalışmalardan farklı olarak tekstil üzerine uygulanan harcı basınçlı bir şekilde püskürterek uygulamış ve bağlanmayı arttırmaya çalışmıştır. Bir başka çalışmada, Giovanni ve diğerleri (2014) yine TGSK ile güçlendirilen betonarme döşemelerin performansını değerlendirmişlerdir. Jung ve diğerleri (2016) yine tek doğrultulu ve karbon bazlı TGSK ile güçlendirilmiş betonarme döşeme elemanlarında eğilme etkisini incelemiş ancak diğer çalışmalardan farklı olarak güçlendirme uygulaması sırasında ankraj sistemi de kullanmışlardır. Uygulanan ankraj sistemiyle süneklikte de artışlar olduğu gözlemlenmiştir. Betonarme döşemelerin TGSK ile güçlendirilmesi konusunda literatürde yer alan çalışmaların neredeyse tamamında tek doğrultulu betonarme döşeme kullanılmıştır. Çift doğrultulu döşemelerle ilgili çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Literatür incelendiğinde konu ile ilgili Papanicolaou ve diğerleri (2009) ve Koutas ve Bournas (2017) tarafından yürütülen iki çalışma karşımıza çıkmaktadır. Papanicolaou ve diğerleri (2009) 4 adet kare betonarme döşemeden 3 adedini karbon ya da cam TGSK ile güçlendirmiş ve zımbalama etkisi oluşturmak için döşeme ortasında kantilever yük uygulayarak bu elemanları test etmişlerdir. Sonuç olarak, TGSK'nin zımbalama dayanım kapasitesinin artışında etkili olduğu gözlemlenmiştir. Diğer çalışmada ise Koutas ve Bournas (2017) 1.80 m kenar uzunluğuna sahip 6 adet kare betonarme döşeme elemanı üretmişler, bunlardan biri referans eleman olarak seçmişler ve dört noktada dağılmış monotonik yükleme altında test etmişlerdir. Değişkenler olarak ise, TGSK'nin cinsi (bazalt ya da cam), TGSK tabaka sayısı ve hasar oranı olarak seçilmiştir. Deneyle sonuçlarında TGSK'nin uygulanma şekline de bağlı olarak çift doğrultulu döşemelerde taşıma kapasitesine olumlu katkılar da bulunduğu gözlemlenmiştir. TGSK ile güçlendirme konusunda yapılan çalışmalar genel olarak ele alındığında en az sayıdaki çalışmanın çift doğrultulu betonarme döşemelerde olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte pratikte çoğu kez zorunlu sebeplerden dolayı (asma kat, baca ve tesisat) döşemelerde boşluklar bırakılmakta ve bu döşemelerde zımbalama etkisi oldukça kritik bir durum haline gelmektedir. Boşluklu betonarme döşemelerin zımbalama dayanımının artırılması için TGSK ile güçlendirilmesi konusunda herhangi bir çalışmaya rastlanmamış, araştırılmaya açık ve uygulamalar düşünüldüğü zaman oldukça önemli bir konu olduğu düşünülmektedir. Yapılan literatür taraması ve incelemeler sonucunda birden fazla boşluğa sahip çift doğrultulu betonarme döşemelerin zımbalama yüklemesi etkisi altındaki davranışlarının incelendiği ve boşlukların döşemelerin zımbalama performansı üzerinde meydana getirdiği olumsuz etkilerin azaltılması için güçlendirme literatürüne yeni yeni girmeye başlayan TGSK şeritler ile boşluklu döşemelerin güçlendirilmesine yönelik deneysel bir çalışma yapılması planlanmıştır. Deneysel programda incelenen değişkenler betonarme döşemede yer alan boşlukların konumudur. Biri boşluksuz referans deney elemanı olmak üzere toplamda 5 adet betonarme deney elemanı üretilmiş ve zımbalama yüklemesi etkisi altında test edilerek döşemelerin yük-deplasman davranışları, maksimum taşıma güçleri, başlangıç rijitlikleri ve enerji tüketim kapasitesi değerleri elde edilerek yorumlanmıştır.

2. Deneysel Çalışma

Deneysel programda çift doğrultulu döşemelerde yer alan birden fazla boşluğun konumunun zımbalama dayanımı üzerindeki etkilerinin ve döşemelerdeki boşluğun zımbalama davranışı üzerinde meydana getirdiği olumsuz etkilerin azaltılması için TGSK şeritler ile uygulanan güçlendirme tekniğinin performans etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Bu amaca yönelik olarak beş adet çift doğrultulu betonarme döşeme deney elemanı üretilmiş ve basit mesnetli olacak şekilde test edilmiştir. Deney elemanları 2000×2000×120 mm boyutlarında kirişsiz çift doğrultulu betonarme döşeme olarak tasarlanmış olup, deney elemanlarının donatı şeması **Şekil 1'de** verilmiştir. Deneysel programda yer alan deney elemanlarının özellikleri **Tablo 1'de** sunulmuştur. Deneysel programda yer alan birinci deney elemanı boşluksuz ve güçlendirme uygulanmayan referans deney elemanıdır. Deney elemanı 2 ve 3'te ise 300×300 mm kare geometriye sahip iki adet boşluk iki farklı konumda bırakılmış ve deney elemanları üzerinde boşlukların meydana getirdiği olumsuz etkilerin yorumlanabilmesi için güçlendirilmeden test edilmiştir. Deney elemanı 2'de yer alan boşluklar zımbalama yüklemesinin uygulandığı kolona göre kolona bitişik şekilde kolonun hemen üstünde ve altında paralel

olarak konumlandırılmıştır. Deney elemanı 3'te ise boşluklar döşeme kolonunun köşe noktalarına bitişik şekilde diyagonal şekilde yerleştirilmiştir. Deneysel programda yer alan 4. ve 5. deney elemanlarında ise boşlukların olumsuz etkilerinin azaltılması için TGSK şeritler ile döşemelere güçlendirme uygulanmıştır. Döşemelerin beton dökümü, hazır beton kullanılarak aynı anda tek grup halinde yapılmıştır. Döşemelerin test edildiği gün $150 \times 150 \times 150$ mm boyutlarındaki küplerden ölçülen ortalama basınç dayanımı (beş numuneden alınan ortalama değerler) standart silindir numune (150×300 mm) dayanımına çevrilerek Tablo 1'de her deney elemanı için verilmiştir. Kolon boyuna donatısı ve döşemelerde çekme ve basınç donatısı olarak kullanılan 10 mm çapındaki nervürlü donatıların akma dayanımı 480 MPa, çekme dayanımı 627 MPa ve elastisite modülü ise 195 GPa'dır. Kolon etriyelerinde kullanılan 4 mm çapındaki düz donatı için bu değerler 280 MPa, 427 MPa and 193 GPa'dır. Bu değerler beş numuneden elde edilen ortalama değerlerdir. Tüm döşemeler eğilmeye karşı yüksek dayanıma sahip olacak şekilde donatılandırılmıştır.

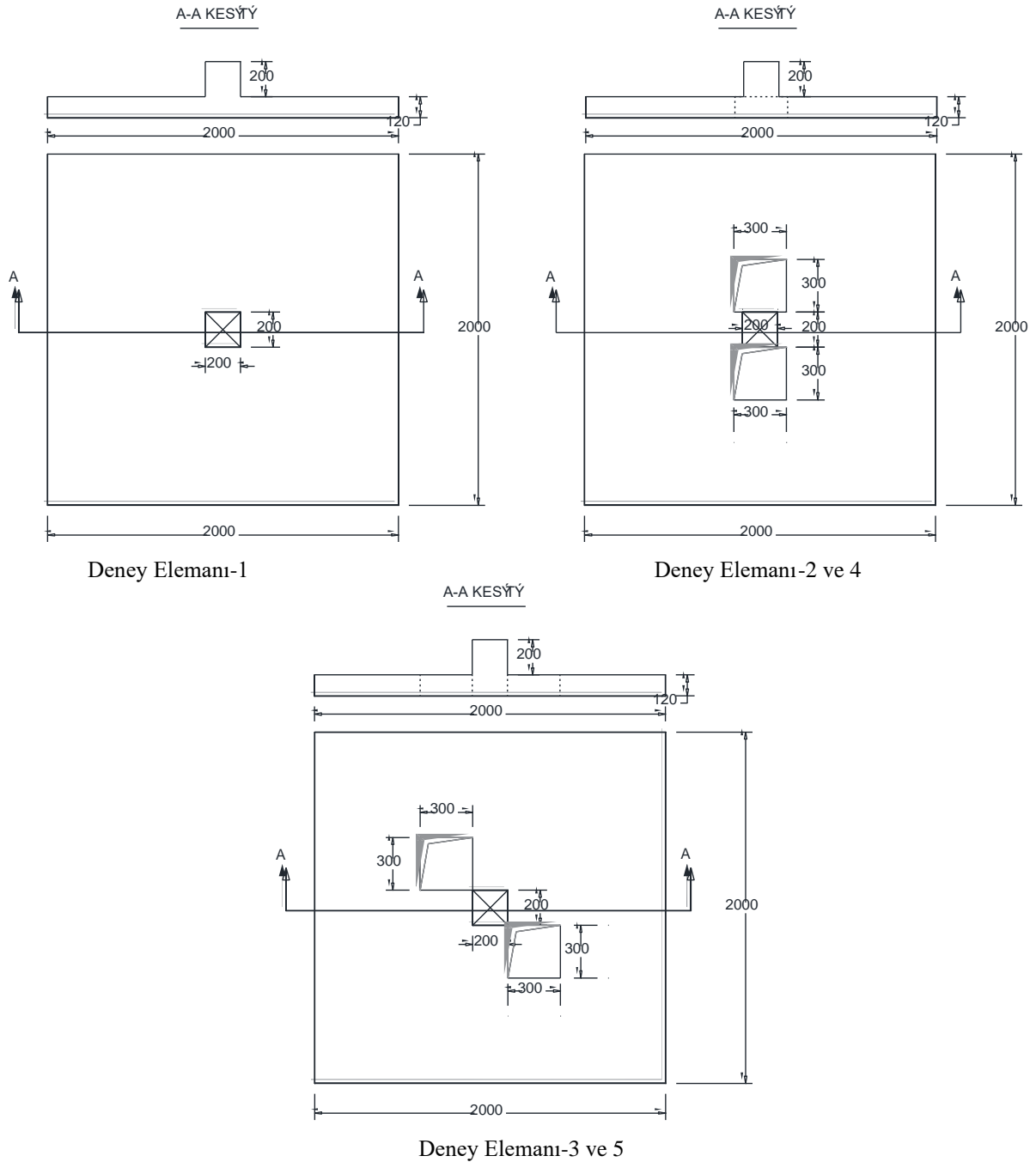


Şekil 1. Deney elemanlarının geometrik boyutları ve donatı detayı (Tüm ölçüler mm'dir.)

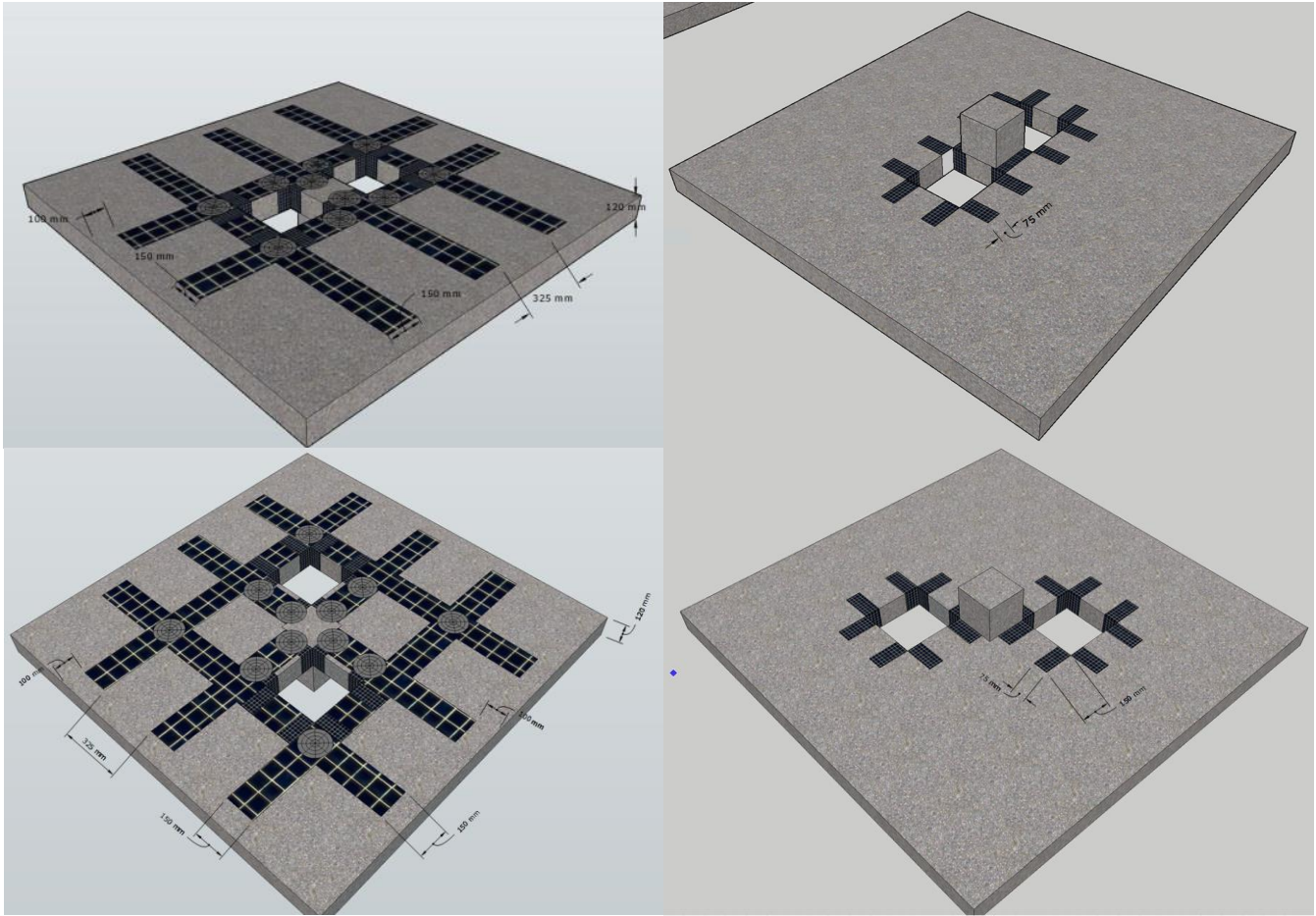
Tablo 1. Deney elemanlarının özellikleri

Deney El. No	Uygulama Türü	Beton Basınç Dayanımı f_c (MPa)	Boşluk Büyüklüğü (mm)	Boşluğun Konumu
1	Güçlendirmesiz	25,6		Boşluksuz referans deney elemanı
2		25,2	300x300	Kolona göre paralel alt ve üstte
3		25,4		Kolona göre diyagonal köşelerde
4	TGSK şeritler ile güçlendirme	24,8	300x300	Kolona göre paralel alt ve üstte
5		25,1		Kolona göre diyagonal köşelerde

10 mm çapa sahip nervürlü donatılar döşemenin üst tarafında her iki yönde 215 mm aralıklarla, alt tarafında yine her iki yönde 175 mm aralıklarla yerleştirilmiştir. Döşemenin alt tarafında bulunan tüm nervürlü donatıların uç kısımları 90° yukarı yönlü eğilerek ankrajlama sağlanmıştır. Bunların yanı sıra, gerçek bir binada bulunan döşemede açılan boşluğu en iyi şekilde temsil edebilmek için basınç ve çekme donatıları boşlukların denk geldiği bölümlerde kesilmiş ve boşluk kenarlarında ayrıca özel bir donatılardırma detayı uygulanmamıştır. Deneysel çalışma kapsamında döşemelerde bırakılan boşlukların büyüklükleri ve konumları **Şekil 2**'de verilmiştir.

**Şekil 2.** Deney elemanlarında bırakılan boşlukların konumları (Tüm ölçüler mm'dir.)

Deneyel programda yer alan Deney elemanı-4 ve 5'te TGSK şeritler ile güçlendirme uygulanmıştır. Deney elemanlarına uygulanan güçlendirmenin detayları **Şekil 3**'te verilmiştir. Deney elemanlarına uygulanan güçlendirme detaylarında TGSK şeritler döşemelerin alt yüzeylerine yerleştirilmiş ve boşlukların köşe noktalarına ise döşemelerin üst yüzeyine bağlantı sağlayan ek şeritler yerleştirilerek gerilme yoğunlaşmalarının olduğu bu bölgelerde şeritlerin yüzeyden ayrılmalarına engel olunmaya çalışılmıştır. Ayrıca TGSK şeritlere ek olarak yine karbon malzemeden üretilen ankrajlar şeritlerin üst üste geçiş noktalarında boşlukların köşe noktalarına denk gelecek şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 3. Deney elemanlarına TGSK şeritler ile uygulanan güçlendirmenin detayları (Tüm ölçüler mm'dir.)

Deney elemanlarının güçlendirilmesinde karbon malzemesi kullanılarak üretilen bir tekstil türü kullanılmıştır. Karbon tekstilin beton yüzeyinden soyulmasını geciktirmek için geleneksel sıva karışımlarının yerine yapısal kalın tamir harcı tercih edilmiştir. Tamir harcının özellikleri üretici firmadan temin edilmiştir. Karışım çimento esaslı ve tek bileşenlidir. Polimer katkısının yanında elyaf katkı da içermektedir. Çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri **Tablo 2**'de verilmiştir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen güçlendirme tekniğinin uygulama adımları sırasında alınan fotoğraflardan seçilen örnekler **Şekil 4**'de verilmiştir. Şekil 4'de çalışmada kullanılan karbon tekstil malzemesi ve ankrajlar için kullanılan karbon ip malzemeleri görülmektedir. Karbon ipin kök bölümü için epoksi kullanılmış ve ankrajlar epoksi kullanılarak döşemelere açılan deliklere bağlanmıştır. Güçlendirme uygulanmasında ilk olarak karbon tekstilin yerleştirileceği bölümler pürüzlendirilmiş ve ankrajların yerleştirileceği delikler açılmıştır. Daha sonra yüzey ve delikler komprasör ile basınçlı hava kullanılarak temizlenmiş ve nemlendirilmiştir.

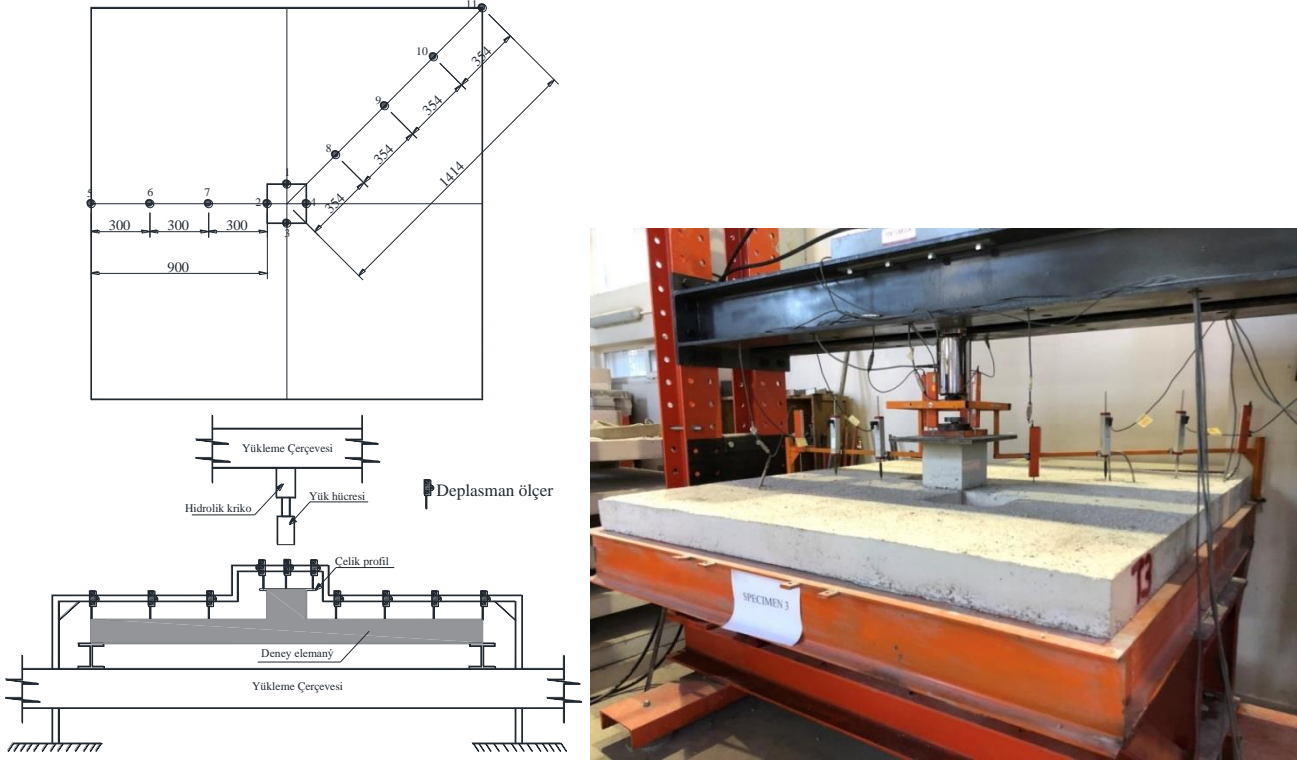
Bu aşamadan sonra boyutlarına göre kesilen karbon tekstil şeritler döşeme alt yüzeyine yerleştirildikten sonra karbon ip malzemesi ile hazırlanan ankrajlar konumlarına yerleştirilerek epoksi ile beton yüzeye ve karbon tekstil şeritlere yapıştırılarak ankrajlar tamamlanmıştır. Bir gün süre ile ankrajların epoksilerinin sertleşmesi beklenildikten sonra özel sıva malzemesi karıştırılarak tekstil şeritlerin alt ve üzerine 10 mm kalınlıkta olacak şekilde sürülerek şeritler sıva ile kapatılmıştır. Güçlendirmesi tamamlanan deney elemanları döşemelere sürülen sıvanın dayanımına ulaşabilmesi için 28 gün kür ortamında bekletildikten sonra test edilmeye hazır hale gelmiştir. Deneylerin gerçekleştirildiği test ve ölçüm düzeneği **Şekil 5**'te gösterilmiştir. Deney elemanları mesnet görevi gören çelik profillerin üzerine özel olarak üretilmiş kapalı bir çerçeve içerisine yerleştirilmiştir. Kolona zımbalama yüklemesi olarak uygulanan eksenel yüklemeye 1000 kN kapasiteli bir hidrolik kriko vasıtasıyla uygulanmış ve bilgisayara bağlı 1000 kN kapasiteli bir yük hücresi ile ölçülmüştür. Eksenel yük, deney elemanlarının merkezinde bulunan kolona rijit bir çelik plaka ile eşit olarak dağıtılmıştır. Yükleme motor kontrollü hidrolik bir yüklemeye sistemi uygulanmış ve hızı sabit bir yük artış oranı deneylerde özdeş olacak şekilde kullanılmıştır. Deney elemanlarının kolon eksenel deformasyonu ve döşeme deformasyon profillerini belirlemek için **Şekil 5**'te gösterilen konumlarda 11 adet dikey deformasyon ölçümü alınmıştır. Ölçümler, elektronik deplasman ölçerler (LVDT'ler) ile alınmış ve bilgisayara aktarılmıştır. Alınan ölçümler aracılığı ile deney elemanlarının yük-deplasman ilişkileri, maksimum taşıma kapasiteleri, rijitlikleri ve enerji tüketim kapasiteleri elde edilmiş ve performansları değerlendirilmiştir.

Tablo 2. Uygulanan güçlendirme yönteminde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

Karbon tekstilin (hasır şeklinde) özellikleri*	
Özellikler	Değer
Çekme dayanımı	255 kN/m
Ağırlık	350 gr/m ²
Kalınlık	1,43 mm
Elastisite modülü	235 MPa
Göçme uzaması	%1,7
Ankraj için kullanılacak karbon ipin özellikleri*	
Çap	6 mm
Fiber Yoğunluk	1,8 gr/cm ³
Fiber Çekme Mukavemeti	>3800 MPa
Fiber Elastiklik Modülü	>230000 MPa
Fiber Kopmadaki Uzama	%1,7
Sıva karışımının özellikleri*	
Eğilme dayanımı	> 7 MPa
Beton yüzeye yapışma dayanımı	> 2 MPa
Basınç dayanımı	>60 MPa
Elastisite modülü	> 20 GPa
Ankraj yapımında kullanılan epoksinin özellikleri*	
Yoğunluk	1,31 kg/lt
Karışım oranı	Beyaz/Gri bileşen =4/1
Uygulama sıcaklığı	Min +10°C, max +35°C
Çekme dayanımı	30 MPa

*değerler üreticiden temin edilmiştir.

**Şekil 4.** Deney elemanlarına TGSK şeritler ile uygulanan güçlendirme adımlarından alınan fotoğraflardan örnekler



Şekil 5. Deney ve ölçüm düzeneği

3. Deneysel Sonuçlar ve Yorumlar

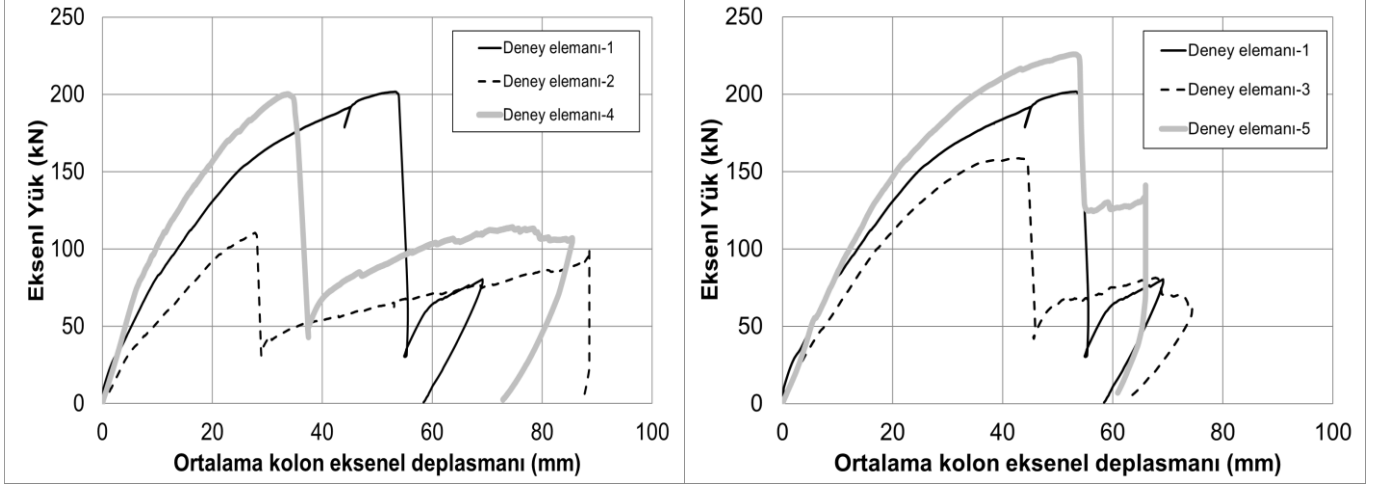
Deneyel çalışma sonucunda çift doğrultulu betonarme döşeme deney elemanları için elde edilen yük-deplasman grafikleri kullanılarak deney elemanlarının maksimum taşıma gücü, başlangıç rijitliği ve enerji tüketim kapasiteleri elde edilmiş ve bu değerler yorumlanarak boşlukların çift doğrultulu betonarme döşemelerin zımbalama yüklemesi etkisi altındaki genel davranışları üzerinde meydana getirdiği olumsuz etkiler ve bu etkilerin azaltılması için çalışma kapsamında önerilen güçlendirme metodunun döşemelerin performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deney elemanlarının testlerinden elde edilen sonuçlar **Tablo 4'te** sunulmuştur. Ayrıca testler sonucunda elde edilen yük-deplasman grafikleri boşluksuz, güçlendirme uygulanmayan referans Deney Elemanı-1 ile karşılaştırılarak **Şekil 6'da** verilmiştir. Deney elemanlarının performanslarının yorumlanması için kullanılan maksimum taşıma gücü, başlangıç rijitliği ve enerji tüketim kapasitesi değerlerinin hesaplanmasında kullanılan yaklaşımlar ise **Şekil 8'de** tipik bir yük-deplasman grafiği üzerinde gösterilmiştir.

Tablo 4. Deney Sonuçları

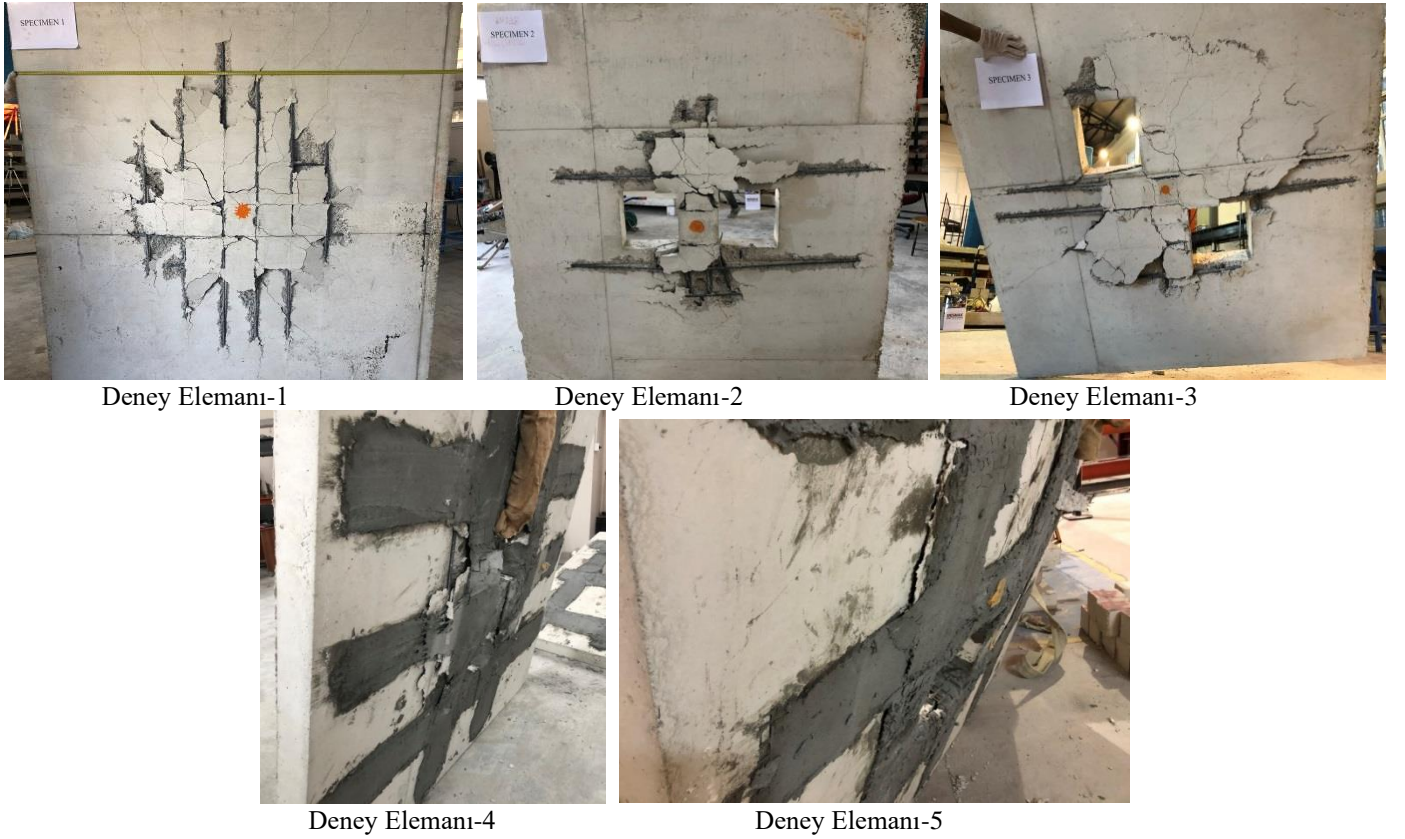
Deney El. No	Maksimum Taşıma Gücü (kN)	Maksimum Taşıma Gücünde Deplasman (mm)	Başlangıç Rijitliği (kN/mm)	Enerji Tüketim Kapasitesi (kN-mm)
1	201,73	53,33	9,49	7684
2	110,41	27,79	5,33	1907
3	158,61	42,99	6,59	4912
4	200,19	33,87	12,02	4742
5	225,88	52,81	13,27	8427

Deney elemanlarının testler sonucunda hasar dağılımları ve meydana gelen zımbalama göçme şekillerini gösteren fotoğraflar ise **Şekil 7'de** verilmiştir. Deney elemanı-1'de boşluk bulunmadığı için klasik bir zımbalama göçmesi gözlemlenmiştir. Öncelikle çekme bölgesinde kolon çevresinde kılcal çatlaklar oluşmaya başlamış ve yük arttıkça bu çatlaklar kolon köşelerinden deney elemanının köşelerine doğru ilerlemiştir. Yük artmaya devam ettikçe çatlaklar kolon ile deney elemanının kenarları arasında kalan bölgenin orta bölgelerinde yoğunlaşarak dallanmaya ve büyümeye başlamıştır. Deney elemanı zımbalama kapasitesine ulaştığında ani bir yük kaybı ile gevrek şekilde göçmüştür. Basınç bölgesinde kolonun oturması gözlemlenmiş ve herhangi bir çatlak oluşmamıştır. Deney elemanı-2'de öncelikle kolon altında küçük kılcal çatlaklar gözlemlenmiştir. Daha sonra boşluklara dik yönde 45 derece açılarla kesme çatlakları oluşmuştur. Kesme çatlakları boşluklara zıt yönde kolona bitişik olarak başlamış ve boşluk kenarının dörtte birlik mesafesinden geçerek kolon ve mesnet arasında kalan bölgenin ortasına doğru ilerlemiştir. Deney elemanının köşe noktalarında yüklemeye doğrultusunda zıt yönde kalkma gözlemlenmiştir. Çatlaklar bu aşamadan sonra büyümüş ve deney elemanın zımbalama kapasitesi aşılıp gevrek göçme meydana gelmiştir. Deney elemanının basınç bölgesinde önemli bir çatlak gözlemlenmemiştir. Deney elemanı-3'te, deney elemanı-2'ye göre daha büyük bir zımbalama çevresi meydana gelmiştir. Çatlaklar öncelikle çekme bölgesinde kolon çevresinde ve kolon köşesinden döşeme köşelerine doğru kılcal boyutlarda ilerlemiştir. Zımbalama göçmesi sırasında boşlukların dış köşe noktalarının arasında büyük çatlaklar oluşmuştur. Deney elemanının basınç bölgesinde boşluklar arasında çatlaklar oluşmuştur. Deney elemanı 4'te, U şekilli TGSK şeritlerinde kolon kesme çatlakları ve

kolon deplasmanı önlenirken öte yandan deney elemanının taşıma kapasitesi artırılmış ve şeritte bulunan tekstil malzemesinde taşıma kapasitesine ulaşarak kopmalar gözlemlenmiştir. Bu davranış kolon çevresini kuşatan U şekilli TGSK şeritlerinde daha fazla görülmüştür. İşçilik kalitesine bağlı olarak şeritlerin yüzeyden sıyrılarak ayrıldığı tespit edilmiştir. Deney elemanı-5 ise referans deney elemanına göre daha büyük yük kaybı ile gevrek bir şekilde zımbalama etkisine maruz kalmıştır.



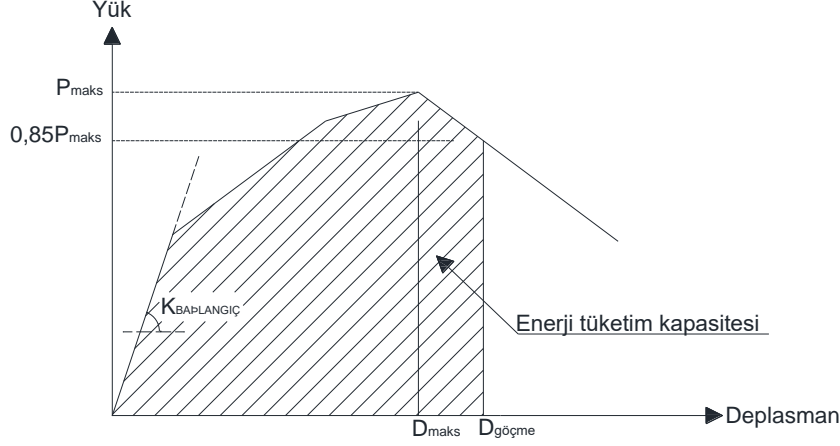
Şekil 6. Deney elemanlarının yük-deplasman grafikleri



Şekil 7. Deney elemanlarının hasar dağılımları

Deneyel çalışma kapsamında güçlendirilmeden test edilen boşluksuz Deney Elemanı-1 ve 300×300 mm boyutlarında iki adet boşluğa sahip Deney Elemanı 2 ve 3'ün sonuçları incelendiğinde çift doğrultulu betonarme döşemelerde bırakılan boşlukların genel yük-deplasman davranışını ve zımbalama performansını son derece olumsuz etkilediği görülmüştür. Deney elemanlarında yer alan boşluklar döşemelerin maksimum taşıma gücü kapasitesi, başlangıç rijitliği ve enerji tüketim kapasitesi değerlerinin boşluksuz referans Deney Elemanı-1'e göre sırasıyla ortalama %33, %37 ve %56 oranlarında azalmasına neden olmuştur. Deney elemanlarında yer alan boşlukların konumları da döşemelerin zımbalama yüklemesi etkisi altındaki performans düzeyleri ve genel yük deplasman davranışları üzerinde etkili olan bir parametredir. 300×300 mm boyutlarında iki adet boşluğu kolona paralel olarak alt ve üstte konumlandırılan Deney Elemanı-2'nin maksimum taşıma gücü, başlangıç rijitliği ve enerji tüketim kapasitesi değerleri, boşluksuz Deney Elemanı-1 referans deney elemanından sırasıyla %45, %44 ve %75 oranlarında azalmıştır. 300×300 mm boyutlarındaki boşlukların konumları değişim gösterip kolona göre köşe noktalarına diyagonal olacak şekilde konumlandırıldığı Deney Elemanı 3'ün zımbalama yüklemesi etkisi altındaki davranışı Deney Elemanı-2'ye göre bir miktar daha iyi olmasına rağmen yine

de maksimum taşıma gücü, başlangıç rijitliği ve enerji tüketim kapasitesi değerleri, boşluksuz Deney Elemanı-1 referans deney elemanına göre %27, %31 ve %36 oranlarında azalmıştır. Elde edilen bu sonuçlar döşemelerde bırakılan boşlukların zımbalama yüklemesi etkisi altındaki davranışı çok büyük ölçüde olumsuz etkilediğini, döşemelerin maksimum taşıma gücü, başlangıç rijitliği ve enerji tüketim kapasitesi gibi önemli parametrelerinin hepsinin birden azalmasına neden olduğunu göstermiştir.



Şekil 8. Deney elemanlarının başlangıç rijitliği ve enerji tüketim kapasitelerinin hesaplanmasında kullanılan yaklaşım

Çalışma kapsamında boşlukların döşemelerin zımbalama yüklemesi etkisi altındaki davranışı üzerinde meydana getirdiği olumsuz etkileri azaltmak için geliştirilen güçlendirme metodu uygulanarak test edilen Deney elemanı 4 ve 5'ten elde edilen sonuçlar incelendiğinde önerilen güçlendirme metodunun maksimum taşıma gücü ve başlangıç rijitliği değerlerinin iyileştirilmesinde son derece etkili olduğu ve bu değerleri önemli oranlarda artırdığı görülmüştür. Geliştirilen güçlendirme metodunun boşluklu döşemelerin maksimum taşıma güçleri ve başlangıç rijitliği değerleri üzerinde meydana getirdiği iyileştirme son derece yüksek oranda olmuş, birden fazla boşluklu döşemelerin performans düzeylerini boşluksuz referans Deney Elemanı-1 düzeyine çıkartmayı başarmıştır. Uygulanan güçlendirme metodu boşluklu döşemelerin enerji tüketim kapasitesinin artırılmasında da etkili olmuş güçlendirme uygulanmayan boşluklu deney elemanlarına göre önemli oranda bir artış meydana getirmiş ve Deney Elemanı 5'te enerji tüketim kapasitesi boşluksuz Deney Elemanı-1 referans deney elemanı enerji tüketim kapasitesi değerini aşmıştır. Tekstil takviyeli şeritler ile güçlendirilen 300×300 mm boyutlarında iki adet boşluğu kolona paralel olarak alt ve üstte konumlandırılan Deney Elemanı-4'ün maksimum taşıma gücü değeri boşluksuz Deney Elemanı-1 referans deney elemanı ile eşit sayılabilecek düzeye ulaşmış, başlangıç rijitliği değeri %27 daha fazla elde edilmiş ve enerji tüketim kapasitesi değeri ise %38 oranında azalmıştır. Tekstil takviyeli şeritler ile güçlendirilen 300×300 mm boyutlarında iki adet boşluğu kolonun köşelerinde diyagonal konumda yer alan Deney Elemanı-5'in maksimum taşıma gücü, başlangıç rijitliği ve enerji tüketim kapasitesi değerleri boşluksuz Deney Elemanı-1 referans deney elemanından sırasıyla %12, %40 ve %10 oranlarında daha fazla elde edilmiştir. Uygulanan güçlendirme metodu Deney Elemanı-5 üzerinde son derece etkili olmuş ve geliştirilen yöntem ile güçlendirilen döşeme boşluksuz Deney Elemanı-1'in maksimum taşıma gücü, başlangıç rijitliği ve enerji tüketim kapasitesi değerlerinin tümünde geçerek son derece yüksek bir performans sergilemiş ve başarılı olmuştur.

Deney elemanlarında meydana gelen zımbalama göçmesi sonrasında yükleme işlemine devam edilmiştir. Bu işlem sonucunda Şekil 6'da verilen yük deplasman grafikleri incelendiğinde yük için ikinci bir tepe noktası olduğu görülmüştür. Bunun nedeni zımbalama sonrasında oluşan yeniden dağılım ile deney elemanlarının bir kiriş gibi eğilme kuvvetlerine karşı çalışmaya başlamasından kaynaklandığı düşünülmüştür.

4. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında birden fazla boşluğun çift doğrultulu betonarme döşemelerin zımbalama yüklemesi etkisi altındaki genel yük deplasman davranışları ve performansları üzerinde meydana getirdiği olumsuz etkilerin incelenmesi ve söz konusu olumsuz etkilerin azaltılması için güçlendirme uygulamalarında yeni yeni kullanılmaya başlanan TGSK şeritler ile geliştirilen yeni bir güçlendirme metodunun etkinlik düzeyinin yorumlanması amaçlanmıştır. Bu amaçla çalışmada 5 adet deney elemanı üretilmiş ve 2 deney elemanı geliştirilen güçlendirme metodu ile güçlendirilerek, güçlendirme uygulanmayan deney elemanları ile karşılaştırılarak metodun performans üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada incelenen değişken betonarme döşemelerde bırakılan boşlukların konumudur. Kolona paralel olarak alt ve üste bitişik olarak bırakılan iki adet boşluğun döşemelerin zımbalama davranışını, maksimum taşıma gücü, başlangıç rijitliği ve enerji tüketim kapasitesi değerlerini boşlukların kolona göre diyagonal şekilde köşe noktalar ile bitişik şekilde konumlandırıldığı duruma göre daha fazla olumsuz etkilediği görülmüştür. Uygulanan güçlendirme metodu boşlukların her iki konumda da yer alması durumunda döşemelerin maksimum taşıma gücü, başlangıç rijitliği ve enerji tüketim kapasitesi değerlerini önemli oranlarda artırmış ve zımbalama yüklemesi etkisi altındaki genel yük-deplasman davranışında etkili bir performans artışı sağlamıştır. Özellikle boşlukların diyagonal şekilde konumlandırıldığı Deney Elemanı-5'te geliştirilen güçlendirme metodu son derece etkili olmuş maksimum taşıma gücü, başlangıç rijitliği ve enerji tüketim kapasitesi değerlerinin tümü boşluksuz referans Deney Elemanı-1'in değerlerinin üzerine geçerek beklenenin ötesinde bir performans artışı sağlanmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma, “119M985” proje numarası ve “Boşluk Yeri ve Büyüklüğü Değişen Çift Doğrultulu Betonarme Döşemelerin Tekstil ile Güçlendirilmiş Sıva ve Karbon Takviyeli Elyaf Kumaşlar ile Zımbalamaya Karşı Güçlendirilmesi” proje başlığı ile TÜBİTAK-1001-Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı tarafından finanse edilmiştir.

Referanslar

Aksoylu, C., Yazman, Ş., Özkılıç, Y. O., Gemi, L., & Arslan, M. H. (2020). Experimental analysis of reinforced concrete shear deficient beams with circular web openings strengthened by CFRP composite. *Composite Structures*, 249, 112561.

Gemi, L., Aksoylu, C., Yazman, Ş., Özkılıç, Y. O., & Arslan, M. H. (2019). Experimental investigation of shear capacity and damage analysis of thinned end prefabricated concrete purlins strengthened by CFRP composite. *Composite Structures*, 229, 111399.

Gemi, L., Madenci, E., Özkılıç, Y. (2020). Çelik, Cam FRP ve Hibrit Donatılı Betonarme Kirişlerin Eğilme Performansının İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8 (2) , 1470-1483 . DOI: 10.29130/dubited.629354.

Giovanni, L., Lorenzo, L., Diana, A., Antonio, N. 2014. “Performance of RC Slab-Type Elements Strengthened with Fabric-Reinforced Cementitious-Matrix Composites”, *ASCE Journal of Composites for Construction*, 18(3), 1-9.

İşleyen, Ü. K., Ghoroubi, R., Mercimek, Ö., Anil, Ö., and Erdem, R. T. (2021). Behavior of glulam timber beam strengthened with carbon fiber reinforced polymer strip for flexural loading. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 0731684421997924.

Jesse, F., Weiland, S., and Curbach, M. 2008. “Flexural strengthening of RC structures with textile-reinforced concrete”, *ACI Special Publication*, 250, 49–58.

Jung, K. S. H., Hong, S. H., Ko, K. N., Cho, W. J., Yong-In. 2016. “An Experimental Study on the Flexural Capacity of RC Slab Strengthened with Textile Reinforced Mortar (TRM)”, *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, 7(4), 1-10.

Koutas L. N., Bournas, D. A. 2017. “Flexural Strengthening of Two-Way RC Slabs with Textile-Reinforced Mortar: Experimental Investigation and Design Equations”, *ASCE Journal of Composites for Construction*, 21(1), 4016065, 1-11.

Mercimek, Ö., Ghoroubi, R., Anil, Ö., Çakmak, C., Özdemir, A., and Koprman, Y. (2020). Strength, ductility, and energy dissipation capacity of RC column strengthened with CFRP strip under axial load. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 1-19.

Mercimek, Ö., Ghoroubi, R., Baran, M., and Anil, Ö. (2021). Behaviour of steel beams retrofitted with anchored carbon-fibre-reinforced polymer strip. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 1-32.

Özkılıç, Y. O., Yazman, Ş., Aksoylu, C., Arslan, M. H., & Gemi, L. (2021). Numerical investigation of the parameters influencing the behavior of dapped end prefabricated concrete purlins with and without CFRP strengthening. *Construction and Building Materials*, 275, 122173.

Papanicolaou, C., Triantafillou, T., Papantoniou, I., Balioukos, C. 2009. “Strengthening of two-way reinforced concrete slabs with textile reinforced mortars (TRM)”, *Proc., 4th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS4)*, M. Curbach and F. Jesse, eds., Dresden, Germany, 409–420.

Ghoroubi, R., Mercimek, Ö., Özdemir, A., and Anil, Ö. (2020, December). Experimental investigation of damaged square short RC columns with low slenderness retrofitted by CFRP strips under axial load. In *Structures (Vol. 28, pp. 170-180)*. Elsevier.

Ghoroubi, R., Mercimek, Ö., Sakın, S., and Anil, Ö. (2021). Novel bond-slip model between concrete and angular CFRP fan type anchored CFRP strip. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-19.

Schladitz, F., Frenzel, M., Ehlig, D., Curbach, M. 2012. “Bending load capacity of reinforced concrete slabs strengthened with textile reinforced concrete”, *Engineering Structures*, 40, 317–326.

Zwicky D. 2013. “Concrete Slab Strengthening with CFRP Textile Reinforced Shotcrete”, *IABSE Symposium Rotterdam*.



Finansal Oranları Kullanarak Havayolu Şirketlerinin Performans Değerlendirmesi

Performance Evaluation of Airlines Using Financial Ratios

Aşır Özbek¹, Masoumeh Ghouchi²

¹Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale MYO, Bil. Tek. Böl. 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE
²Kırıkkale Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletm. Böl. 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 31/12/2020

Kabul / Accepted: 11/03/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 23/05/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Küreselleşen ve hızla gelişen dünya ekonomisinde, ülkelerin sosyokültürel ve ekonomik gelişiminde büyük pay sahibi olan ve rekabetin artmasına katkı sağlayan en önemli faktörlerden biri de hızla büyüyen ve gelişen havayolu taşımacılığıdır. Bu çalışmanın amacı da Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden olan Weighted Aggregated Sum Product Assessment (WASPAS) ve Evaluation Based on Distance from Average Solution (EDAS) yöntemleri kullanılarak Avrupa'nın önde gelen 5 havayolu şirketinin 2009-2018 yıllarındaki on yıllık finansal performansını değerlendirmektir. Bu amaç doğrultusunda değerlendirmeye alınan 5 havayolu şirketinin bilançolarından elde edilen finansal oranlar, ÇKKV yöntemlerinden olan WASPAS ve EDAS yöntemleri ile analiz edilmiştir. Çalışmada kullanılan "cari oran", "asit test oranı", "nakit oranı", "finansal kaldıraç oranı", "aktif devir hızı", "alacak devir hızı", "duran varlıklar devir hızı", "özsermaye karlılığı", "aktif karlılığı", "faaliyet kâr marjı", "brüt kâr marjı" ve "net kâr marjı" olmak üzere toplamda 12 adet değerlendirme kriteri literatür çalışması neticesinde belirlenmiştir. Kriter ağırlıkları Entropi yöntemiyle belirlenmiştir. Havayolu şirketleri bu kriterlere göre belirtilen yöntemler ile 2009-2018 yıllarındaki performansı değerlendirilmiş ve şirketlerin performanslarına göre sıralamaları yapılmıştır. Avrupa'nın önde gelen 5 havayolu şirketinin finansal oranlara göre analiz edilmesi neticesinde performansı en yüksek firmanın Ryanair olduğu ortaya konmuştur. Son sırada ise Lufthansa yer almıştır.

Anahtar Kelimeler

"Havayolu şirketleri, Finansal Performans, Çok Kriterli Karar Verme, Entropi, WASPAS, EDAS"

Abstract

A major factor with a large share in the socio-cultural and economic development of countries, contributing to the increase of competition in the globalizing and rapidly developing world economy is the rapidly growing and developing air transport. This study aimed to evaluate the ten-year financial performance of Europe's leading 5 airline companies between 2009 and 2018. Two Multi-Criteria Decision-Making methods (MCDM), the Weighted Aggregated Sum Product Assessment (WASPAS) and the Evaluation based on Distance from Average Solution (EDAS), were employed in the study. The financial ratios obtained from the balance sheets of 5 airline companies were analyzed using WASPAS and EDAS methods. The 12 criteria determined for the assessment in light of the literature study were "current ratio", "acid test ratio", "cash ratio", "financial leverage ratio", "asset turnover rate", "receivable turnover rate", "fixed assets turnover rate", "return on equity", "asset "Profitability", "operating profit margin", "gross profit margin" and "net profit margin". Criterion weights were determined by the Entropy method. The 2009-2018 performances of the 5 airline companies were evaluated and the companies were ranked according to the results. The study revealed that Ryanair showed the best performance, while Lufthansa was found to be the one with the lowest efficiency.

Key Words

"Airline companies, Financial Performance, Multi Criteria Decision Making, Entropi, WASPAS, EDAS"

1. Giriş

Günümüzde hızlı bir şekilde büyüyen ve gelişen ulaşım ve taşımacılık sektörü, ülkelerin sosyokültürel ve ekonomik kalkınmalarına katkı sağlayan en önemli faktörlerden birisidir. Taşımacılık hizmeti, canlı veya cansız olan her varlığın zamandan tasarruf sağlayarak bir mekândan farklı bir mekâna kolaylıkla gitmesini sağlayan bir hizmettir. Taşımacılık; sağladığı zaman faydasının yanı sıra ekonomik ve elverişli mekân değişimine de imkân sağladığı ölçüde değerli olur ve böylece dünyanın her bölgesinde mekân ve zaman ilişkileri kurulmuş olur. Taşımacılıkta uygun fırsatların varlığı veya yokluğu birçok ulusun, bölgenin, şehrin, sanayinin, kurumların, işletmelerin gelişmesine veya geri kalmasına neden olmuştur (Gerede, 2015:3). Yüzyıllardır sürekli gelişmekte olan ulaşım ve taşımacılık, insanların yaşamlarındaki ekonomik ve sosyokültürel gelişimleri için yaşamsal bir faktördür. Dünyada 20. Yüzyılın başlarında ticari uçuşların da başlamasıyla birlikte havacılık endüstrisinin gelişmesi daha da ivme kazanmıştır. 1970'lerde ABD'nin iç hatlarda başlattığı serbestleşmenin etkisiyle yayılan liberalleşme birçok ülkeyi de etkileyerek, dünyada sivil havacılık için yeni bir dönem başlatmıştır (Aldemir ve Kuyucak Şengür, 2018: 142). Küreselleşen ve hızla gelişen dünya ekonomisi, artan rekabet ve uluslararası lojistik alanındaki gelişmeler ile ulaşım sektöründe havayolu taşımacılığı da son yıllarda oldukça önem kazanmıştır.

İşletmelerin en önemli kontrol işlevlerinden birisi de finansal performans ölçümüdür. Finansal veriler, yönetim performansı raporlarını oluşturan, yönetsel başarı veya başarısızlığı doğrulayan ve gelmekte olan zorlukların sinyallerini oluşturan ve habercisi olan ticari işletmelerin göstergeleridir. Kaynakların kısıtlı olduğu rekabetçi bir ortamda, finansal performans ölçümü ve yönetimi çok önemlidir. Finansal performans kriterleri işletmelerin rekabet gücünü yansıttığından dolayı finansal performansın doğru ve uygun bir şekilde değerlendirilmesi oldukça önemlidir (Feng ve Wang, 2000: 134; Safaei Ghadikolaei vd., 2014: 275). Finansal performans, şirketlerin mali değerleri ile hesaplanan kar ve zarar arasındaki doğru ve uygun ilişkinin kurulması ve şirketin finansal gücünün ve zayıflıklarının belirleme sürecini oluşturmaktadır. İşletmelerdeki bu süreç karar alıcılar ve yöneticiler açısından oldukça önemlidir (Al Masum ve Tuz-Johora, 2012: 38). Dünyada havayolu şirketlerinin yoğun rekabeti nedeniyle, finansal performanslarını ölçmek ve analiz etmek daha da önemli hale gelmiştir. Finansal performans, işletmelerin yaptıkları yatırım faaliyetlerinin güvenilirliğini ve riskini değerlendirmede ve genel anlamda işletmenin geleceğine dair alacağı finansal kararlarda oldukça önemlidir.

Günümüzde seçeneklerin çok olmasının yanı sıra, karar sürecinde etkili olan kriterler de çeşitlenerek çoğalmıştır. İşletmeler, yatırımcılar ve analistler de küreselleşen piyasalarda ortaya çıkan finansal krizlerin, farklılıkların ve yeni risklerin oluşturduğu belirsizlik, sorunlarının çözümü, varlıklarının devamı için karar verme sürecinin etkin olarak kullanılmaktadırlar. Günümüzde işletmelerin karşı karşıya kaldıkları sorunların ve risklerin çözümünde finansal tabloların değerlendirilmesinin yanı sıra çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerini de kullanarak etkin bir finansal yönetimin olması sağlanmıştır.

Bu çalışmada ÇKKV yöntemlerinden WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) ve EDAS (Evaluation Based on Distance from Average Solution) yöntemleri kullanılarak Avrupa'nın önde gelen beş havayolu şirketinin 2009-2018 yıllarındaki on yıllık finansal performansı değerlendirilmiştir. Finansal veriler firmaların hem belirli bir zamanın hem de geçmiş yıllara ait durumlarını gösterir. Değerlendirilmeye alınan Air France (KLM), Easyjet, Lufthansa, Ryanair ve Türk Hava Yolları (THY) şirketlerin finansal performans analizi ve ölçülmesi için bilançolarından elde edilen finansal oranlar ÇKKV yöntemlerinden WASPAS ve EDAS ile analiz edilmiştir. Literatür çalışması neticesinde 4 başlıkta toplam 12 finansal oran, kriter olarak belirlenerek havayolu şirketlerinin 2009-2018 yıllarındaki on yıllık finansal performansını değerlendirilerek başarı sıralaması elde edilmiştir Kriter ağırlıkları nesnel uygulamalara uygun olan Entropi yöntemi ile belirlenmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümüne havayolu şirketlerinin performansını ölçmeye yönelik yapılan çalışmalara değinilmiştir. Üçüncü bölümde çalışmada kullanılan yöntemler detaylı olarak tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde akış şeması formatında çalışmanın sürecini gösteren bir model geliştirilmiş ve çalışmanın bulgularına yer verilmiştir. Son bölümde ise çalışma değerlendirilmiş ve gelecekte bu konularda çalışmak isteyen araştırmacılara önerilerde bulunulmuştur.

2. Literatür Araştırması

Akkaya (2004), finansal oranlar yardımıyla havayolu firmalarının performanslarını gri bölge ve TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity) yöntemini kullanarak değerlendirmiştir. Wang (2008), yaptığı çalışmada Tayvan havayollarının finansal performansını Bulanık ÇKKV yöntemi ile analiz etmiştir. Çalışmada finansal oranları kümelemek ve temsili göstergeler bulmak için gri ilişki analiz yöntemi kullanılmıştır. Wang ve Kao (2009), Bulanık ÇKKV yöntemini kullanarak Tayvan'daki üç yerel havayolunun finansal performanslarını değerlendirmişlerdir. Ömürbek ve Kınay (2013), Borsa İstanbul'da (BIST) faaliyet gösteren bir havayolu şirketi ile Frankfurt Menkul Kıymetler Borsası'nda faaliyet gösteren bir havayolu şirketinin performans göstergelerini kullanarak TOPSIS yöntemi ile finansal performanslarını değerlendirmişlerdir. Barros ve Wanke (2015), Afrika merkezli 29 havayolu işletmesinin 2010-2013 yıllarındaki nisbi verimliliğini TOPSIS, Sinir Ağları ve DEAP yöntemleri ile ölçmüşlerdir. Ölçümde; "çalışan sayısı", "toplam uçak sayısı", "işletme maliyetleri", "ücretli yolcu kilometresi başına gelir" ve "ücretli tonaj kilometresi başına gelir" kriterleri kullanılmıştır. Wanke vd. (2015), "işletme maliyeti", "amortismanlar", "maaş", "çalışanlar", "uçaklar", "toplam aktifler", "duran varlıklar", "gelirler", "fvök", "yolcu sayısı" ve "yolcu mili başına gelir" kriterlerine göre Asya merkezli 35 havayolu işletmesinin 2006-2012 yıllarındaki performansının TOPSIS ve Markov Zinciri Monte Carlo Metodu yöntemleriyle ölçmüşlerdir. Teker vd. (2016), 2011-2014 dönemi için en iyi 20 havayolunun finansal performansını analiz etmişlerdir. Çalışmada havayollarının finansal performansı kısa

ve uzun vadeli şirket kararlarını etkilemekte ve stratejik planlamayı şekillendirmekte olduğu görülmüştür. Akgün ve Soy Temür (2016), mali yapı, faaliyet ve karlılık oranlarını kullanarak Pegasus ve THY işletmelerinin 2010-2015 yıllarındaki finansal performansını TOPSIS yöntemiyle ölçmüşlerdir. Sakız (2017), yaptığı çalışmada havayolu sektöründe finansal oranlar kullanılarak, finansal risk değerlendirme modellerinden biri olan Altman Z'nin notunu incelemiş ve THY'nin son 3 yılda üç aylık mali verilerini içeren bir uygulama gerçekleştirmiştir. Asker (2017), petrol fiyatlarının en yüksek seviyeye ulaştığı 2012 yılından sonrasını baz alarak dünyanın farklı bölgelerinde faaliyet gösteren 16 havayolu işletmesinin etkinliğini Veri Zarflama Analizi (VZA) yöntemini kullanarak incelemiştir. Gümüş ve Boale (2017), BİST'de faaliyet gösteren THY firması ile Pegasus firmasının 2010-2015 dönemine ait finansal performanslarını rasyo tekniği eşitlikleriyle analiz etmişlerdir. Avcı ve Çınaroğlu (2018), Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) ve TOPSIS yöntemlerini kullanarak Avrupa'nın beş havayolu işletmesinin 2012-2016 dönemine ait finansal performanslarını değerlendirerek sıralamalarını yapmışlardır. Perçin ve Aldalou (2018), çalışmalarında bütünlük bulanık AHS ve bulanık TOPSIS yöntemleriyle bir finansal analiz modeli oluşturmuşlardır. Oluşturulan bütünlük bulanık AHS ve bulanık TOPSIS modelini kullanılarak BİST'de işlem gören havacılık sektöründe çalışan şirketlerin finansal performansları değerlendirilmiştir. Battal (2018), The Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) yöntemini kullanarak Türkiye'deki havayolu işletmelerinin finansman sorunları inceleyerek sorunlar arasındaki neden sonuç ilişkisi, ilişki düzeyi ve öncelik durumunu açıklamaya çalışmıştır. Dalak vd. (2018), Türkiye'de halka açık olan ve olmayan havayolu yolcu taşımacılığı şirketlerinin finansal analiz tekniklerinden faydalanma durumlarını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Kaya ve Kendirli (2018), Türkiye'deki havayolu işletmelerinin uygulamaları açısından Hedging yönteminin kullanılmasını incelemiş ve Hedging uygulamalarına bakılarak, havayolu işletmelerinin mali tablolarındaki etkilerini değerlendirilmeye çalışmışlardır. Kiracı ve Asker (2019), havayolu şirketlerinin etkinliklerinin yıllara göre değişimini inceleyerek bu etkinlikleri belirleyen faktörleri ortaya çıkarmışlardır. Çalışmada 2010-2016 dönemine ait dünyanın farklı bölgelerinde faaliyet gösteren 45 havayolu işletmesini VZA ve Tobit Regresyon (TR) yöntemini kullanarak incelemiştir. Kiracı ve Bakır (2019), havayolu firmalarının küresel finans krizi öncesi ve sonrası performansını ÇKKV yöntemini kullanarak incelemiştir. Bu doğrultuda 2005-2012 dönemine ait 13 havayolu işletmesinin performansını EDAS yöntemini kullanarak değerlendirmişlerdir. Kriterlerin ağırlıklarına ise CRITIC yöntemiyle belirlemişlerdir. Çetin ve Altan (2019), bulanık TOPSIS yöntemini kullanarak Ankara Esenboğa Havalimanı'nda hizmet veren 3 havayolu şirketinin performansını değerlendirmişlerdir.

Havayolu şirketlerinin mali performansını ölçmeye yönelik birçok çalışma literatürde yer almasına rağmen, çalışmanın konusunu teşkil eden havayolu şirketlerinin performansını ölçmeye yönelik Entropi, WASPAS ve EDAS yöntemlerinin bütünlük olarak kullanıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu açıdan yapılan bu çalışmanın alana katkı sağlayacağı düşünülmekte ve farklı yöntemlerin de kullanılabilirliğinin görülmesi açısından literatürde boşluğu dolduracağı umulmaktadır.

3. Yöntemler

3.1. Entropi Yöntemi

Entropi kavramı literatürde ilk kez Rudolph Clausius (1865) tarafından bir sistemdeki düzensizliğin ve belirsizliğin bir ölçüsü olarak tanımlanmış ve Shannon (1948) tarafından enformasyon teorisine uyarlanmıştır (Zhang vd., 2011: 444). Entropi yöntemi mevcut verinin sağladığı faydalı bilginin miktarını ölçmede kullanılmaktadır (Wu, 2011: 5163). Yöntemin en önemli özelliği, çeşitli ölçeklerde uygulama olanağı bulması ve nesnel değerlendirme yapabilesidir.

Entropi Yöntemi 5 adımdan oluşmaktadır (Karami ve Johansson, 2014: 523-524 ve Wang ve Lee, 2009: 8982):

Adım 1: Karar matrisinin oluşturulması. Eşitlik (1)'de formüle edildiği gibi ilk olarak seçeneklerin kriterlere göre aldığı değerleri içeren matris oluşturulur.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Adım 2: Karar matrisinin normalize edilmesi. Normalizasyon sürecin iki aşamada gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada kriterlerin fayda veya maliyet yönüne göre işlem yapılmaktadır. Fayda yönlü kriterler için (2), maliyet yönlü kriterler içinse (3) numaralı Eşitlik kullanılmaktadır.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_j x_{ij}} \quad (2)$$

$$r_{ij} = \frac{\min_j x_{ij}}{x_{ij}}, \quad x_{ij} \neq 0 \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$$

Normalizasyon işleminin 2. aşamasında ise (4) numaralı Eşitlik kullanılmaktadır.

$$f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}} \quad (4)$$

Adım 3: Entropi hesaplanır. Entropi değerleri Eşitlik (5) kullanılarak hesaplanır.

$$e_j = \frac{\sum_i^m f_{ij} \ln f_{ij}}{\ln m} \quad (5)$$

Adım4: Entropi ağırlığının hesaplanması. Son aşama olan bu adımda Eşitlik (6) kullanılarak kriterlerin ağırlıkları hesaplanır.

$$w_j = \frac{1 - e_j}{n - \sum_{j=1}^n e_j} \quad (6)$$

3.2 WASPAS Yöntemi

WASPAS yöntemi ÇKKV yöntemlerinden olan ve oldukça yaygın olarak kullanılan Ağırlıklandırılmış Toplam Model (Weighted Sum Model-WSM) ve Ağırlıklandırılmış Çarpım Model (Weighted Product Model-WPM) yöntemlerini temel alan yeni bir ÇKKV yöntemidir. Çok kriterli problemlerin çözümü için alternatiflerin kriterlere göre performansını değerlendiren WASPAS yöntemi, Zavadskas vd. tarafından 2012 yılında geliştirilmiştir. WASPAS yöntemi çözümü sonucunda seçenekler en iyiden en kötüye doğru sıralanmaktadır. WASPAS yöntemi, 6 aşamadan oluşan bir çözüm sürecini içerir (Özbek, 2019: 43).

Adım 1: Karar matrisinin oluşturulması. WASPAS yönteminde ilk olarak seçeneklerin belirlenen kriterlere göre değerlerinin gösterildiği başlangıç karar matrisi oluşturulur. Bu matris Eşitlik (7) ile formüle edilmiştir. Bu matriste; m, seçeneklerin; n ise kriterlerin sayısını göstermektedir. x_{ij} , i. seçeneğin j. kritere göre performans değerini göstermektedir.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Adım 2: Karar matrisinin normalize edilmesi. Karar matrisini normalize etmek için kriterler maliyet yönlü olduğunda (8), fayda yönlü olduğunda ise (9) numaralı Eşitlik kullanılır.

$$x_{ij}^* = \frac{\min_i x_{ij}}{x_{ij}} \quad (8)$$

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}} \quad (9)$$

Adım 3: WSM yöntemine göre seçeneklerin göreceli performansının hesaplanması. Eşitlik (10) ile formüle edildiği gibi her bir seçeneğin kriter değerlerinin, kriter ağırlıkları ile çarpımının toplanmasıyla WSM yöntemine göre seçeneklerin performansı hesaplanır. w_j , kriter ağırlıklarını göstermektedir.

$$P_i^{(1)} = \sum_{j=1}^n x_{ij}^* w_j \quad (10)$$

Adım 4: WPM yöntemine göre seçeneklerin göreceli performansının hesaplanması. Eşitlik (11) ile formüle edildiği gibi her bir seçeneğin kriter değerlerinin kriter ağırlıklarına göre üssünün alınması ve çarpılmasıyla WPM yöntemine göre seçeneklerin performansı hesaplanır.

$$P_i^{(2)} = \prod_{j=1}^n (x_{ij}^*)^{w_j} \quad (11)$$

Adım 5: Seçeneklerin nihai performansının hesaplanması. (12) numaralı Eşitlik kullanılarak seçeneklerin nihai performans değerleri bulunur.

$$P_i = 0.5 P_i^{(1)} + 0.5 P_i^{(2)} \quad (12)$$

Karar verme sürecinin sıralama etkinliğini ve doğruluğunu arttırabilmek için Eşitlik (13) kullanılabilir.

$$P_i = \alpha P_i^{(1)} + (1 - \alpha) P_i^{(2)} \quad (13)$$

α , 0 ile 1 arasında değer alabilen bir parametredir. WASPAS yöntemi, $\alpha=0$ olarak belirlendiğinde WPM yöntemine ve $\alpha=1$ olarak belirlendiğinde ise WSM yöntemine dönüşmektedir. Karar verici α değerini serbest olarak belirleyebilmektedir. Zavadskas vd. α değeri için 0,5 değerini belirlemiş olmasına rağmen α için en uygun değerin hesaplanmasını önermektedir (Özbek, 2019: 45-46).

Adım 6: Seçeneklerin nihai sıralamalarını belirlenmesi. Seçenekler, P_i değerlerine göre en iyiden en kötüye doğru sıralanır. İlk sıradaki seçenek, performansı en yüksek alternatif olarak kabul edilir.

3.3 EDAS Yöntemi

EDAS yöntemi ilk olarak Ghorabae vd. (2015) tarafından geliştirilmiş ve envanter kalemlerinin ABC analizine göre sınıflandırmasını yapmak amacıyla kullanılmış ve geçerliliği test edilmiştir (Kiracı ve Bakır, 2019:159).

EDAS yöntemi aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır (Özbek, 2019:269).

Adım 1: Başlangıç matrisinin (X) oluşturulması. Seçeneklerin kriterlere göre aldığı değerlerin gösterildiği başlangıç karar matrisi Eşitlik (14) ile formüle edildiği gibi oluşturulur. x_{ij} , i. seçeneğin j. kriterine göre performans değerini göstermektedir. m, seçenek; n ise kriter sayısını göstermektedir.

$$X = [X_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Adım 2: Tüm kriterlere göre ortalama çözümün belirlenmesi. Her bir kriterine göre seçeneklerin ortalama değeri Eşitlik (15) yardımıyla elde edilir.

$$AV_j = \frac{\sum_i^m X_{ij}}{m} \quad (15)$$

$$AV = [AV_j]_{1 \times n} \quad (16)$$

Adım 3: Ortalamadan pozitif uzaklık ve negatif uzaklık matrisi oluşturulur. Kriterler fayda yönlü oldukları zaman PDA (ortalamadan pozitif uzaklık) ve NDA (ortalamadan negatif uzaklık) matrisleri (19) ve (20) numaralı Eşitlikler ile, maliyet yönlü oldukları zamanda ise (21) ve (22) numaralı Eşitlikler ile oluşturulur (Özbek ve Engür, 2018: 422).

$$PDA = [PDA_{ij}]_{m \times n} \quad (17)$$

$$NDA = [NDA_{ij}]_{m \times n} \quad (18)$$

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, (X_{ij} - AV_j))}{AV_j} \quad (19)$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max(0, (AV_j - X_{ij}))}{AV_j} \quad (20)$$

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, (AV_j - X_{ij}))}{AV_j} \quad (21)$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max(0, (X_{ij} - AV_j))}{AV_j} \quad (22)$$

Adım 4: PDA ve NDA matrislerinin ağırlıklandırılması. Bu aşamada indisi aynı kriterlerin ağırlık değeri ile PDA ve NDA matrislerinin elemanları çarpılarak PDA ve NDA matrisleri ağırlıklandırılır (Özbek, 2019:274).

Adım 5: Seçeneklerin ağırlıklandırılmış PDA ve NDA değerlerinin toplanması. Her bir seçeneğin kriterlere göre ağırlıklandırılmış değerleri toplanır. Toplam pozitif uzaklık (SP) değerleri Eşitlik (23), toplam negatif uzaklık (SN) değerleri ise Eşitlik (24) kullanılarak hesaplanır.

$$SP_i = \sum_{j=1}^n v_j PDA_{ij} \quad (23)$$

$$SN_i = \sum_{j=1}^n v_j NDA_{ij} \quad (24)$$

Adım 6: Seçeneklerin SP ve SN değerlerinin normalize edilmesi. Her bir seçeneğin toplam pozitif uzaklık (SP) ve toplam negatif uzaklık (SN) normalize değerleri, Eşitlik (25) ve (26) kullanılarak hesaplanır.

$$NSP_i = \frac{SP_i}{\max_i(SP_i)} \quad (25)$$

$$NSN_i = 1 - \frac{SN_i}{\max_i(SN_i)} \quad (26)$$

Adım 7: Sıralama puanının hesaplanması. Her bir seçeneğin normalize toplam pozitif (NSP) ve normalize toplam negatif (NSN) puanlarının ortalaması alınarak seçeneklerin nihai performansı (AS) elde edilir.

$$AS_i = \frac{1}{2}(NSP_i + NSN_i) \quad (27)$$

AS_i değeri, $0 \leq AS_i \leq 1$ koşulunu sağlamalıdır.

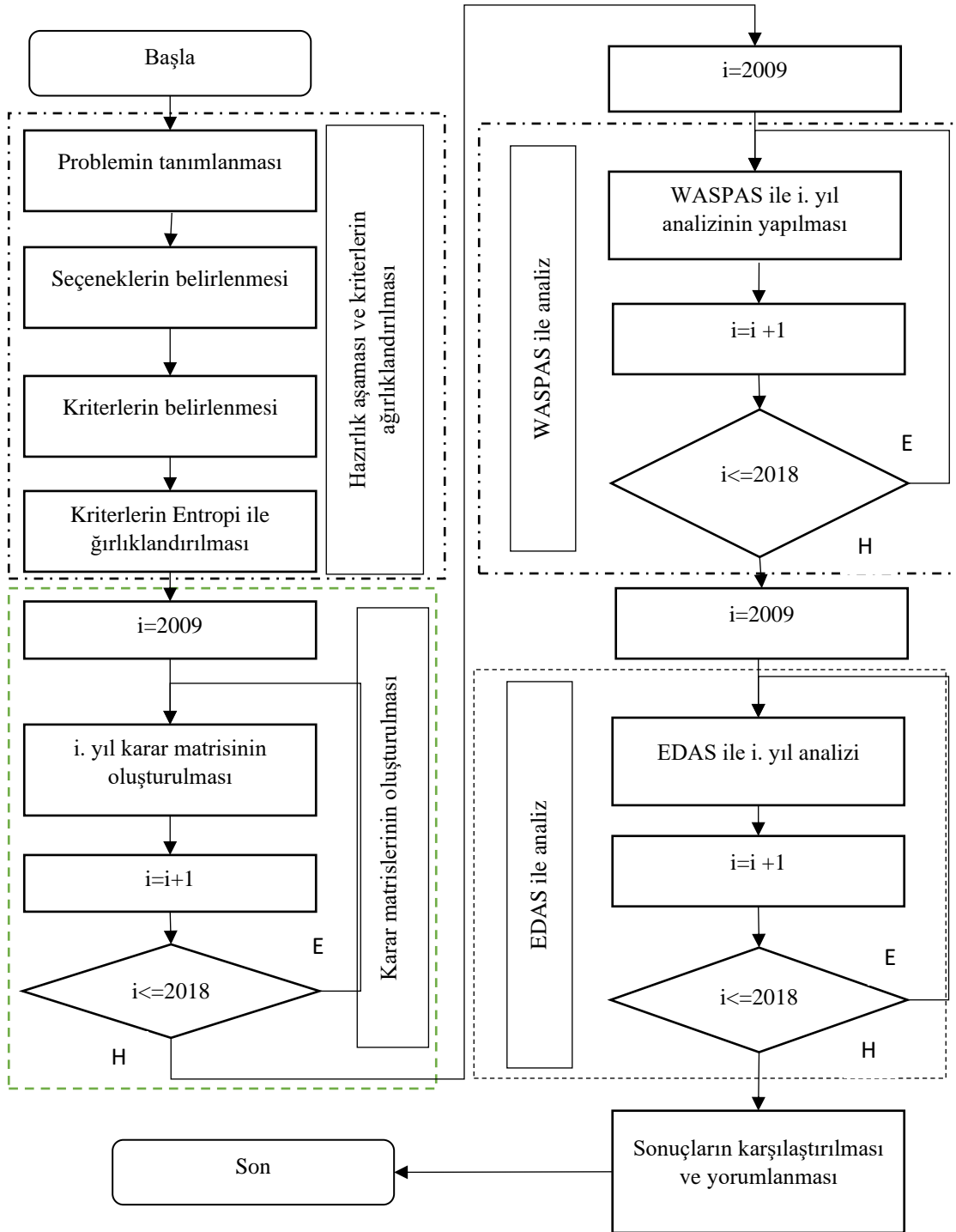
Adım 8: Seçenekler, AS puanına göre azalan düzeyde sıralanır. Nihai performans puanları büyükten küçüğe doğru sıralanır. İlk sıradaki seçenek en yüksek performansa sahip seçenek olarak kabul edilir.

4. Model, Veri Seti ve Bulgular

Avrupa'nın önde gelen 5 havayolu şirketinin 2009-2018 yılları arasındaki finansal performansını değerlendirmek için ÇKKV yöntemlerinden Entropi, WASPAS ve EDAS yöntemleri kullanılmıştır. Değerlendirme süreci için geliştirilen model akış şeması formatı şeklinde Şekil 1'de verilmiştir.

4.1. Model

Şekil 1'de gösterilen model, dört ana kısımdan oluşturulmuştur. Modelde görüldüğü gibi birinci kısmı oluşturan hazırlık aşaması; problemin tanımlanması, seçeneklerin ve kriterlerin belirlenmesi ve kriterlerin Entropi yöntemi ile ağırlıklandırılması sürecinden oluşmaktadır. Bir sonraki adım olan karar matrislerinin oluşturulması aşamasında ise her yıl için 1 adet karar matrisi oluşturulmaktadır. Toplamda 10 adet karar matrisi oluşturulur. Bu matrisler ekte Tablo 8-18'de verilmiştir. Döngü süreci bu işlemi göstermektedir. Bu oluşturulan matrisler her iki yöntemin temel aldığı verileri içermektedir. 3. aşamada WASPAS yöntemi ile seçenekler analiz edilmektedir. Bu işlem her yıl için yapıldığından 10 havayolu şirketinin her yıla ait performans sıralaması gerçekleştirilmektedir. 4. aşama olan son safhada ise EDAS yöntemi ile seçenekler analiz edilmektedir. Bu sürecin sonucunda da her yıl için performans sıralaması elde edilmektedir. Her iki yönteme göre elde edilen bulgular karşılaştırılıp yorumlanmaktadır. Son olarak da havayolu şirketler yıllara göre ve bütüncül olarak değerlendirilerek sonuçlar yorumlanmaktadır.



Şekil 1. Havayolları Şirketlerinin Performansını Değerlendirme Modeli

4.2. Değerlendirme Kriterleri

Araştırmanın amacı, Avrupa'nın önde gelen 5 havayolu şirketinin 2009-2018 yılları arasındaki on yıllık finansal performanslarını Entropi, WASPAS ve EDAS yöntemleri ile değerlendirilmesi ve çıkan sonuçların birbirleriyle karşılaştırılması ve karşılaştırma neticesinde anlamlı bilgilere ulaşılmasıdır. Veriler, belirtilen firmaların 2009-2018 yılları arası bilanço ve gelir tablolarından elde edilmiştir. Çalışmanın konusunu oluşturan havayolu şirketleri alfabetik sırada Tablo 1'de verilmiştir.

Değerlendirmede kullanılan kriterler "likidite oranları", "mali oranlar", "faaliyet oranları" ve "karlılık oranları" başlığı altında gruplandırılmıştır. "Cari oran", "asit test oranı", "nakit oranı", "finansal kaldıraç oranı", "aktif devir hızı", "alacak devir hızı", "duran varlıklar devir hızı", "özsermaye karlılığı", "aktif karlılığı", "faaliyet kâr marjı", "brüt kâr marjı", "net kâr marjı" olmak üzere toplamda 12 kriter literatür çalışması neticesinde belirlenmiştir. "Finansal kaldıraç oranı" kriteri maliyet yönlü iken diğer kriterler fayda yönlüdür.

Finansal performans analizinde kullanılan finansal oranlar ve eşitlikler Tablo 2’de verilmiştir. Çalışmada analizler iki farklı yaklaşımla gerçekleştirilmiştir. İlk olarak kriter ağırlıkları eşit olarak belirlenmiş ve 2. yaklaşımda ise kriter ağırlıkları Entropi yöntemine göre nesnel olarak hesaplanmış ve analizlerde bu kriter ağırlıkları kullanılmıştır.

Tablo 1. Değerlendirmeye Dâhil Edilen Havayolu Firmaları

SNo	Firma Adı
1	Air France (KLM)
2	Easyjet
3	Lufthansa
4	Ryanair
5	THY

Tablo 2. Finansal Performans Değerlendirme Kriterleri

Ana Kriterler	Alt Kriterler	Tanım
	Cari Oran	Dönen Varlıklar/ Kısa Vadeli Yabancı Kaynaklar
Likidite Oranları	Asit Test Oranı	Dönen Varlıklar- Stoklar/ Kısa Vadeli Yabancı Kaynaklar
	Nakit Oran	Hazır Değerler/ Kısa Vadeli Yabancı Kaynaklar
Mali Oranları	Finansal Kaldıraç Oranı	Toplam Borçlar/ Toplam Aktifler
	Aktif Devir Hızı	Net Satışlar/ Toplam Aktifler
Faaliyet Oranları	Alacak Devir Hızı	Net Satışlar/ Ticari Alacaklar
	Duran Varlıklar Devir Hızı	Net Satışlar/ Duran Varlıklar
	Özsermaye Karlılığı	Net Kar/ Özkaynaklar
	Aktif Karlılığı	Net Kar/ Toplam Aktifler
Karlılık Oranları	Faaliyet Kar Marjı	Faaliyet Karı/ Net Satışlar
	Brüt Kar Marjı	Brüt Satış Karı/ Net Satışlar
	Net Kar Marjı	Net Kar/ Net Satışlar

Likidite oranları: Firmaların kısa vadeli borçlarının ödeme gücünün ölçülmesi ve çalışma sermayelerinin yeterli olup olmadığının belirlenmesi için kullanılan oranlardır.

Cari oran: Şirketlerin kısa vadeli yabancı kaynaklarını karşılayabilme gücünü ölçmek ve çalışma sermayelerinin yeterli olup olmadığının belirlenmesi için kullanılan bir orandır. Cari oran değeri 1’den küçük olduğunda, firmalar için kısa vadeli borçlarını ödemek zor olmaktadır.

Asit test oranı: Bir işletmenin bilanço değerlerinin kısa vadeli yükümlülüklerin karşılanması için kısa vadeli varlıklara sahip olup olmadıklarını gösteren bir orandır.

Nakit oranı: İşletme satışlarının durması ve alacaklarının tahsil edilmemesi durumu; kısa vadeli borçları karşılama gücünü göstermektedir.

Mali yapı oranları: Şirketlerin mali yapısını ortaya koyarak uzun vadede borç ödeme kapasiteleri hakkında bilgi vermektedir.

Finansal kaldıraç oranı: Şirket varlıklarının nasıl finanse edildiğini göstermektedir. Bu oranın yüksek olması finansal riskin de yüksek olması demektir.

Faaliyet Oranları: Şirket faaliyetlerinin ne kadar verimli kullanıldığını göstermektedir. İşletmelerin varlık veya varlık gruplarının ve bu varlık gruplarının sağladığı gelirlere oranla ne ölçüde yatırım yaptığını ve bu varlıkların ne ölçüde verimli kullandığını değerlemede kullanılan oranlardır.

Aktif devir hızı: Bu oranla varlıkların her bir lirası ile elde edilen gelirler hesaplanmaktadır. Bu oranın yüksek olması şirketlerin hemen hemen tam kapasiteyle çalıştığını göstermektedir. Bu oran şirketlerin karlılığını belirleyen önemli faktörlerden biridir.

Alacak devir hızı: Şirketlerin alacaklarının tahsil etme yeteneğini ve likiditesini gösteren bu oranın yüksek olması alacakların kısa sürede tahsil edildiğini göstermektedir.

Duran varlıklar devir hızı: Bu oran şirketlerin maddi duran varlıklara gereğinden fazla yatırım yapıp yapmadığını ve şirketlerde âtil kapasitenin olup olmadığını göstermektedir.

Karlılık oranları: Şirketlerin geçmişteki kazanç gücü ve faaliyetlerinin etkinliği hakkında bilgi vermektedir.

Özsermaye karlılığı: Bu oran şirket varlıklarının ne derecede verimli kullanıldığını göstermektedir. Bu oran başarı ve karlılık durumu analizlerinde önemli bir orandır ve yüksek olması arzu edilmektedir.

Aktif karlılığı: Şirket yatırımlarının karlılığını gösteren bu oran şirket aktiflerinin ne ölçüde karlı kullanıldığının tespit edilmesinde kullanılmaktadır.

Faaliyet kâr marjı: Satışlar üzerinden faaliyet karlılığını gösteren bu oran şirketlerin ana faaliyetlerinden ne derecede kar sağladığının belirlenmesi için de kullanılmaktadır.

Brüt kâr marjı: Satılan malların satış fiyatı ile maliyetleri arasında ne derecede bir marjın olduğunu, kaynakların düşük fiyatlarla temin edilip edilmediğini göstermektedir.

Net kâr marjı: Şirket satışlarının vergi sonrası karlılığını gösteren bu oran şirketlerin uyguladığı çeşitli politika ve kararların oluşturduğu sonuçlar hakkında bilgi vermektedir.

4.3. Bulgular

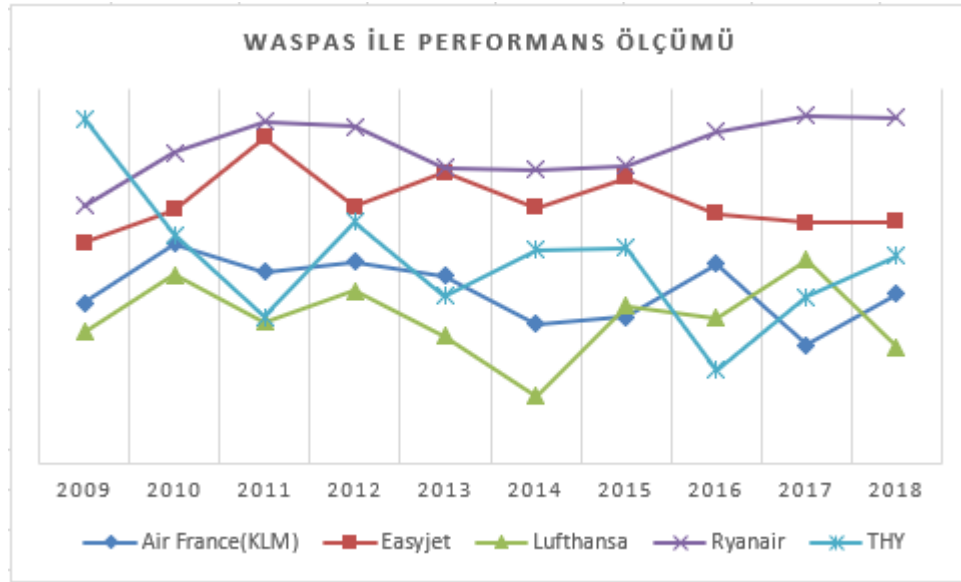
Çalışmada ilk olarak Avrupa'nın önde gelen 5 havayolu şirketinin bilançolarından yararlanarak finansal oranlar hesaplanmış ve bu oranlarla şirketlerin 2009-2018 yılları arasındaki finansal performansı WASPAS ve EDAS yöntemleri ile değerlendirilmiştir. Yöntemlerin uygulamasında kriterlerin ağırlık değeri Entropi yöntemiyle belirlenmiştir. Her yılın analizinde ilgili yılın kriter ağırlıkları kullanılmıştır. Kriter ağırlıkları Tablo 3'de verilmiştir. Yıllar itibariyle incelendiğinde en etkili kriterlerin yıllara göre değiştiği görülmektedir. "Aktif devir hızı", "duran varlıklar devir hızı" ve "finansal kaldıraç oranı" kriterlerinin en az etkili kriterler olduğunu söylemek mümkündür. Kriter ağırlıkları yöntemin doğası gereği her yıl için ayrı ayrı belirlenmiştir. Daha sonra kriter ağırlıkları dikkate alınarak ve eşit kabul edilerek her iki yönetime göre iki farklı yaklaşımla finansal performans ölçümü yapılmıştır. WASPAS ve EDAS yöntemleriyle şirketlerin performansları her yıl için ayrı ayrı ölçülmüştür. Kriter ağırlıkları eşit kabul edilerek WASPAS yöntemi ile değerlendirilen havayolları şirketlerinin finansal performansları ve başarı sıralaması Tablo 4'de verilmiştir. Kriter ağırlıkları dikkate alınarak yapılan analiz sonuçları ise Tablo 5'de verilmiştir. Şirketlerin çizgi grafiği biçimindeki performans göstergeleri ise Şekil 2 ve 3'de verilmiştir. Tablolar ve grafikler karşılaştırıldığında performans ölçümlerinde kriter ağırlıklarının anlamlı olmadığı görülmektedir.

Tablo 3. Kriter Ağırlıkları

Yıl	Cari oran	Asit test oranı	Nakit oranı	Aktif devir hızı	Alacak devir hızı	Duran varlıklar devir hızı	Finansal kaldıraç oranı	Özsermaye karlılığı	Aktif karlılığı	Faaliyet kâr marjı	Brüt kâr marjı	Net kâr marjı
2009	0,0436	0,0458	0,1387	0,0187	0,1169	0,0152	0,0043	0,0716	0,0956	0,2105	0,1401	0,0990
2010	0,0594	0,0641	0,2044	0,0333	0,1542	0,0242	0,0046	0,1071	0,0326	0,0572	0,1537	0,1052
2011	0,0513	0,0564	0,1555	0,0217	0,0701	0,0157	0,0024	0,1515	0,1468	0,1725	0,0437	0,1124
2012	0,0908	0,0978	0,2730	0,0287	0,1274	0,0192	0,0083	0,0455	0,0215	0,0980	0,0933	0,0965
2013	0,0669	0,0722	0,1048	0,0199	0,0970	0,0191	0,0087	0,1994	0,0927	0,1602	0,0791	0,0802
2014	0,0520	0,0677	0,1192	0,0682	0,0618	0,0178	0,0105	0,1048	0,2119	0,0615	0,1162	0,1083
2015	0,1044	0,1118	0,0901	0,0421	0,0932	0,0386	0,0130	0,0366	0,1567	0,0878	0,0480	0,1777
2016	0,0443	0,0480	0,0579	0,0281	0,0816	0,0319	0,0089	0,1495	0,1516	0,1498	0,0262	0,2224
2017	0,0468	0,0490	0,0532	0,0132	0,1349	0,0135	0,0071	0,1216	0,1817	0,1432	0,0198	0,2160
2018	0,0493	0,0532	0,0682	0,0167	0,1677	0,0176	0,0076	0,0884	0,1770	0,0845	0,0423	0,2276

Tablo 4. Havayolu Şirketlerinin WASPAS'a Göre 10 Yıllık Performans Sıralaması (Kriter Ağırlıkları Eşit)

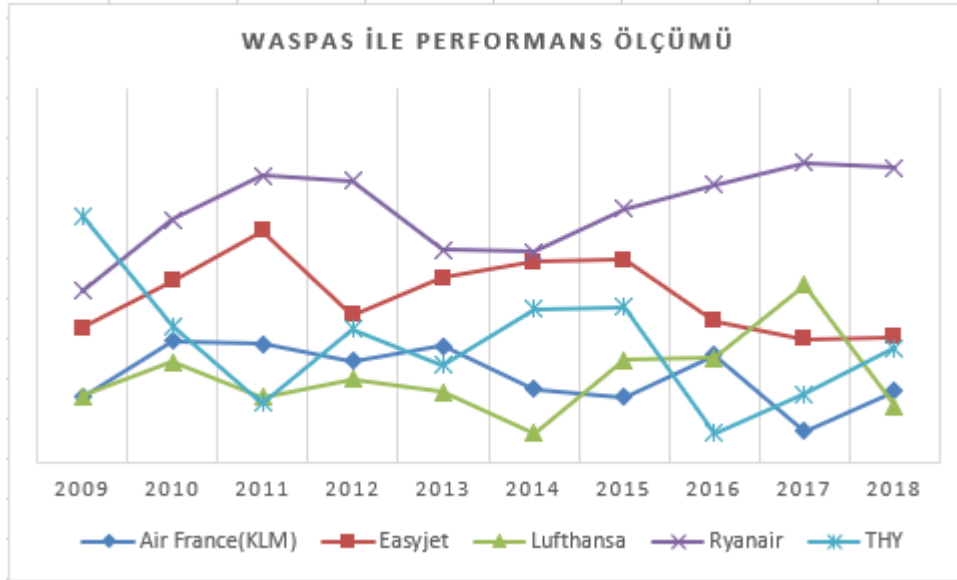
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Air France (KLM)	0,385	0,529	0,461	0,486	0,453	0,336	0,352	0,481	0,221	0,408
Easyjet	0,531	0,612	0,785	0,618	0,700	0,617	0,689	0,602	0,581	0,583
Lufthansa	0,317	0,454	0,339	0,415	0,305	0,160	0,378	0,349	0,490	0,281
Ryanair	0,622	0,751	0,825	0,812	0,713	0,710	0,717	0,801	0,841	0,834
THY	0,833	0,550	0,353	0,583	0,403	0,513	0,518	0,225	0,400	0,500

**Şekil 2.** Havayolu Şirketlerinin WASPAS'a Göre 10 Yıllık Performans Grafiği (Kriter Ağırlıkları Eşit)

Kriter ağırlıklarının eşit kabul edildiği WASPAS yöntemi analizine göre tüm yıllar itibariyle performansı en yüksek şirketin Ryanair olduğu görülmektedir. Bu şirketi Easyjet takip etmektedir. 2015 yılına kadar son sırayı Lufthansa şirketi almıştır. Bu şirketin 2016 yılından itibaren performansını artırdığı ve 3. sıraya yerleştiği anlaşılmaktadır. THY ve Air France şirketleri 2015 yılına kadar 3. ve 4. sırayı dönüşümlü olarak almışlardır. 2016'dan sonra bu şirketler yine dönüşümlü olarak son sıralara yerleşmiştir.

Tablo 5. Havayolu Şirketlerinin WASPAS'a Göre 10 Yıllık Performans Sıralaması (Kriter Ağırlıkları Farklı)

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Air France (KLM)	0,208	0,389	0,379	0,427	0,373	0,233	0,208	0,344	0,100	0,226
Easyjet	0,430	0,583	0,742	0,522	0,591	0,642	0,651	0,453	0,395	0,403
Lufthansa	0,211	0,320	0,207	0,340	0,223	0,093	0,328	0,335	0,568	0,179
Ryanair	0,550	0,779	0,922	0,872	0,682	0,675	0,813	0,890	0,961	0,946
THY	0,792	0,437	0,190	0,534	0,313	0,492	0,498	0,093	0,217	0,366



Şekil 3. Havayolu Şirketlerinin WASPAS'a Göre 10 Yıllık Performans Grafiği
(Kriter Ağırlıkları Farklı)

Kriter ağırlıklarının farklı ele alındığı WASPAS analizinde de durum değişmemiştir. Ryanair 1. sırayı alırken Easyjet 2. sırayı almıştır. 2014 yılına kadar son sırayı Lufthansa şirketi almıştır. THY ve Air France şirketlerinin 3. ve 4. sırayı dönüşümlü olarak aldıkları görülmektedir. 2015 yılından itibaren bu durum değişmiş ve bu şirketler dönüşümlü olarak 4. ve 5. sıraya gerilemişlerdir. Şekil 2 ve Şekil 3'de verilen grafikler birlikte değerlendirildiğinde anlamlı bir farkın olmadığı görülmektedir. THY her iki grafiğe göre de 2011 ve 2016 yıllarında en kötü performansını göstermiştir. Dikkat çekici bir başka durum ise 2014 yılından itibaren performans artışı gösteren Lufthansa'nın 2018 yılında dip yapmasıdır.

EDAS yöntemi ile değerlendirilen havayollarının finansal performansları ve başarı sıralaması ise Tablo 6 ve 7'de ve verilmiştir.

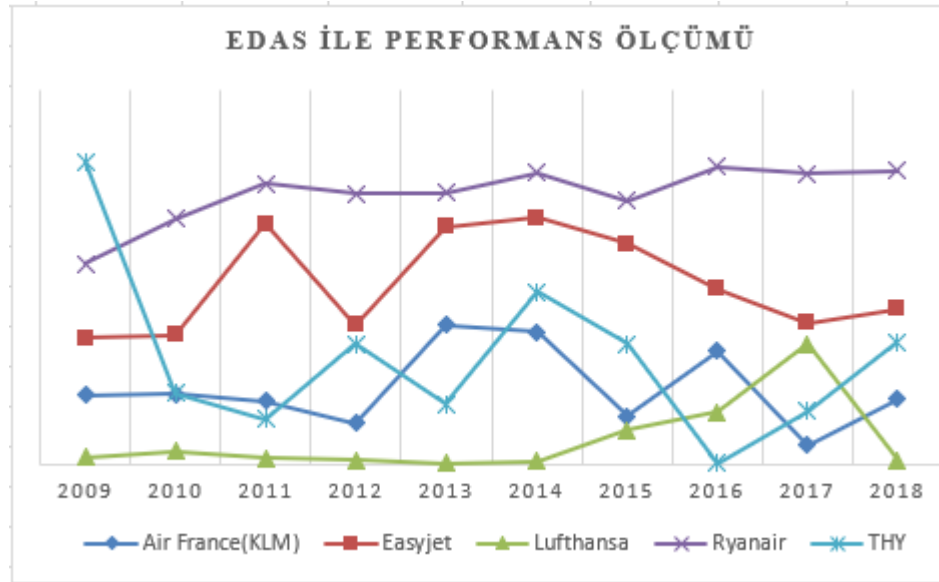
Tablo 6. Havayolu Şirketlerinin EDAS'a Göre 10 Yıllık Performans Sıralaması (Kriter Ağırlıkları Eşit)

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Air France (KLM)	0,221	0,222	0,201	0,129	0,445	0,423	0,154	0,361	0,061	0,208
Easyjet	0,403	0,413	0,767	0,443	0,758	0,788	0,703	0,561	0,451	0,496
Lufthansa	0,020	0,041	0,019	0,011	0,001	0,010	0,107	0,166	0,385	0,012
Ryanair	0,640	0,783	0,896	0,864	0,867	0,932	0,843	0,950	0,930	0,939
THY	0,967	0,226	0,144	0,385	0,190	0,550	0,385	0,001	0,168	0,389

WASPAS yöntemi ile yapıldığı gibi EDAS yöntemi ile de şirketler iki farklı şekilde analiz edilmiştir. İlkinde kriter ağırlıkları eşit kabul edilmiş ikincisinde ise Entropi yöntemi ile hesaplanan kriter ağırlıkları sürece katılmıştır. Her iki yaklaşımın sonuçlarına göre şirketlerin performansları anlamlı bir farklılık göstermemiştir. Her iki yaklaşımda da Ryanair 1., Easyjet 2. sırayı almıştır. Lufthansa 2014 yılına kadar her iki yaklaşımda son sırayı alırken bu tarihten itibaren performans artışı gösterdiği gözlenmiştir. THY ve Air France ise 3. ve 4. sıraları yıllara göre dönüşümlü olarak almışlardır. Her iki yaklaşımda da Easyjet firmasının 2014 yılından itibaren performans düşüşü sergilediği görülmektedir.

EDAS ve WASPAS yöntemleri birlikte değerlendirildiğinde her iki yöntemle göre farklı yaklaşımlar dikkate alındığında şu sonuçlara varılmıştır:

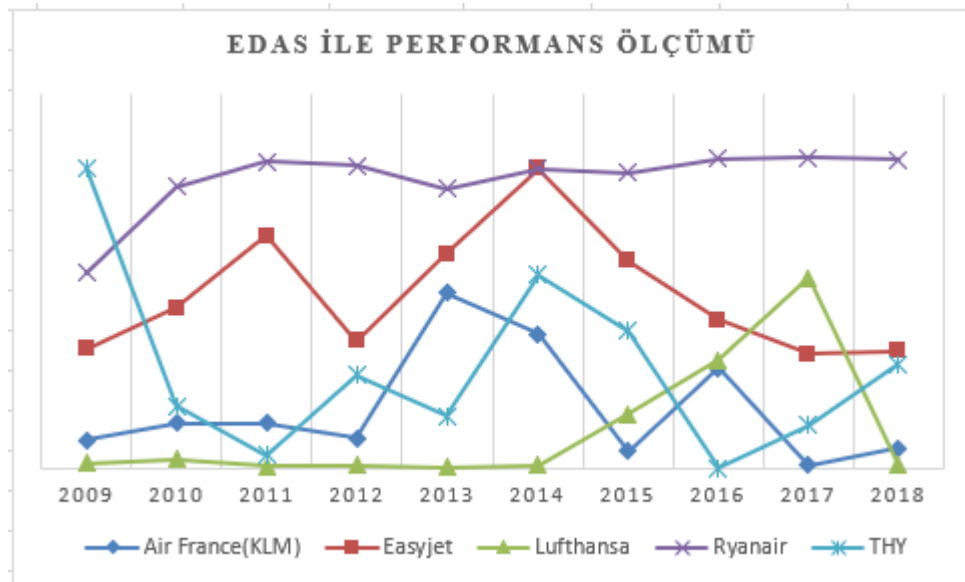
1. Ryanair şirketinin her dört yaklaşıma göre en yüksek performansı elde ettiği belirlenmiştir.
2. Easyjet şirketinin her dört yaklaşıma göre de 2017 yılı dışındaki tüm yıllar itibarıyla 2. sırayı aldığı belirlenmiştir. Ayrıca bu şirketin 2014 yılından itibaren performans kayıpları yaşadığı görülmektedir.
3. Lufthansa şirketi 2014 yılına kadar son sırayı alırken bu tarihten sonra performansını artırdığı ancak 2017 yılından itibaren düşüşe geçtiği gözlemlenmiştir.
4. THY ve Air France şirketleri 2015 yılına kadar 3. ve 4. sıraları değişmeli olarak alırken bu yıldan sonra 4. ve 5. sıraları dönüşümlü olarak almışlardır.



Şekil 4. Havayolu Şirketlerinin EDAS'a Göre 10 Yıllık Performans Grafiği
(Kriter Ağırlıkları Eşit)

Tablo 7. Havayolu Şirketlerinin EDAS'a Göre 10 Yıllık Performans Sıralaması (Kriter Ağırlıkları Farklı)

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Air France(KLM)	0,087	0,143	0,143	0,094	0,562	0,430	0,054	0,321	0,008	0,062
Easyjet	0,379	0,511	0,744	0,405	0,685	0,959	0,663	0,474	0,364	0,373
Lufthansa	0,013	0,028	0,004	0,009	0,001	0,007	0,173	0,345	0,610	0,007
Ryanair	0,624	0,901	0,982	0,969	0,895	0,957	0,944	0,989	0,993	0,988
THY	0,961	0,197	0,039	0,298	0,165	0,618	0,438	0,000	0,135	0,331



Şekil 5. Havayolu Şirketlerinin EDAS'a Göre 10 Yıllık Performans Grafiği
(Kriter Ağırlıkları Farklı)

5. Sonuç ve Değerlendirme

Hızlı bir şekilde gelişen ve büyüyen havayolu taşımacılığı sektörü dünya ekonomisi ve ülkelerin ekonomik ve sosyo-kültürel gelişmelerine fayda sağlayan en önemli sektörlerden biridir. Uluslararası ortamda havayolu şirketlerinin yoğun rekabeti nedeniyle

varlıklarını başarılı bir şekilde sürdürebilmeleri için finansal performans anlamında yüksek ve başarılı bir performansa sahip olmaları gereklidir.

Çalışmada Avrupa'nın önde gelen 5 havayolu şirketinin 2009-2018 yıllarındaki on yıllık finansal performansı ÇKKV yöntemlerinden WASPAS ve EDAS yöntemleri ile on farklı kriter dikkate alınarak analiz edilmiş ve finansal performans bakımından başarı sıralaması ortaya konmuştur. Çalışmada her bir yöntem iki farklı yaklaşımla uygulanmıştır. Birincisi kriter ağırlıkları dikkate alınmadan ikincisi ise kriter ağırlıkları dikkate alınarak. Kriter ağırlıkları Entropi yöntemiyle her yıl için belirlenmiştir. Yani kriterlerin ağırlıkları yıllara göre değişiklik göstermektedir. En etkili kriterlerin yıllara göre değiştiği görülmektedir. “Aktif devir hızı”, “duran varlıklar devir hızı” ve “finansal kaldıraç oranı” kriterlerinin en az etkili kriterler olduğunu söylemek mümkündür. Çalışmada kullanılan kriterlerden “finansal kaldıraç oranı” maliyet yönlü iken diğer kriterler fayda yönlüdür.

Analiz neticesinde finansal performansı en yüksek havayolu firmasının her iki yöntem ve dört farklı yaklaşıma göre Ryanair olduğu belirlenmiştir. Ryanair şirketini Easyjet takip etmiştir. Easyjet şirketi her iki yöntemin kriter ağırlıkları dikkate alınmadan yapılan analize göre 2. sırayı alırken; kriter ağırlıkları dikkate alınarak yapılan analizde 2017 yılından itibaren 3. sıraya düştüğü görülmüştür. Lufthansa'nın 2015 yılına kadar her iki yöntemin her iki yaklaşımına göre son sırada yer aldığı görülmüştür. Bu yıldan itibaren bu şirketin performansında 1 veya 2 basamak yükselmesine rağmen 2018 yılında tekrar son sıraya yerleşmiştir. THY ve Air France şirketlerin 3. ve 4. sırayı yıllara göre dönüşümlü olarak paylaştıkları anlaşılmaktadır. Her iki yönteme göre havayolu şirketlerinin on yıllık finansal performans sıralaması dikkate alındığında; sıralamanın Ryanair, Easyjet, THY, Air France ve Lufthansa şeklinde olduğu görülmektedir.

Finansal performans analizinde en yüksek performansa sahip olan Ryanair ve Easyjet havayolu şirketleri “düşük maliyetli” havayolu şirketleridir. “Düşük tarifeli hizmetler” sunan Ryanair ve Easyjet havayolları zamanla hem yüksek ve istikrarlı gelirlere hem de yolcu sayısı bakımından yüksek doluluk oranlarına ulaşmışlardır. Uygulanan bu strateji ve yükselen doluluk oranları sayesinde satış gelirlerinin ve kar marjlarının arttığı ve bu sayede devir hızlarının ve karlılık oranlarının yükseldiği de düşünülmektedir. Böylelikle bu firmalar havayolu sektörünün ileri gelen yüksek performanslı firmalarından olmayı başarmaktadırlar.

Bu çalışma ile analiz kapsamında yer alan işletme yöneticilerine kendi ve rakip işletmelerinin durumu hakkında ışık tutulmaktadır. Çıkan sıralamaya göre performansı düşük işletmelerin rekabet edebilir duruma gelmesi için bir dizi çalışma yaparak gerekli tedbirleri zamanında almaları gerektiği ortaya çıkmıştır.

Bu konularda ileride çalışma yapmak isteyen araştırmacılar, farklı kriterler kullanarak veya farklı ÇKKV yöntemlerini sürece dahil ederek aynı şirketleri değerlendirebilirler. Ayrıca bu çalışmada Entropi yöntemi ile nesnel olarak hesaplanan kriter ağırlıkları başka nesnel ya da öznel yöntemler kullanılarak belirlenebilir ve analizlerde bu ağırlıklar kullanılabilir. Farklı kriterler kullanıldığında şirketlerin performansını en çok etkileyen kriterleri belirleyerek duyarlılık analizi yapıp sonuçlar yorumlanabilir.

Kaynakça

- Akgün, M., & Soy Temür, A. (2016). BIST Ulaştırma Endeksine Kayıtlı Şirketlerin Finansal Performanslarının TOPSİS Yöntemi İle Değerlendirilmesi, Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi, 30, 173-186.
- Akkaya, G. C. (2004). Finansal Rasyolar Yardımıyla Havayolları İşletmelerinin Performansının Değerlendirilmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 19(1), 15-29.
- Al Masum, A., & Tuz-Johora, F. (2012). Performance Evaluation of Selected Ceramic Companies of Bangladesh, Asian Business Review, 1(1), 37-47.
- Aldemir, H. Ö., & Kuyucak, Şengür, F. (2018). Türkiye’de Havayolu Rekabeti Üzerine Yazılmış Lisansüstü Tezlerin İncelenmesi, Journal of Aviation, 2(2), 141-155.
- Asker, V. (2017). Veri Zarflama Analizi ile Finansal ve Operasyonel Etkinlik Ölçümü: Geleneksel Havayolu İşletmelerinde Bir Uygulama, Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 18(1).153-172.
- Avcı, T., & Çınaroğlu, E. (2018). AHP Temelli TOPSIS Yaklaşımı ile Havayolu İşletmelerinin Finansal Performans Değerlemesi, Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 19(1), 316-335.
- Barros, C. P., & Wanke, P. (2015). An analysis of African air lines efficiency with two-stage TOPSIS and neural networks, Journal of Air Transport Management, 44, 90-102.
- Battal, Ü., (2018). Türkiye’de Havayolu Taşımacılığının Finansman Sorunları: DEMATEL Yöntemi Uygulaması, Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 11(2), 96-111.
- Çetin, A., & Altan, Ş. (2019). Bulanık TOPSIS Yöntemiyle Havayolu Şirketleri Performans Değerlendirmesi: Esenboğa Hava limanında Bir Uygulama, Giresun Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 5(1), 40-61.

- Dalak, S., Günay, F., Beyazgül, M., & Karadeniz, E. (2018). Türkiye'de Faaliyet Gösteren Havayolu Şirketlerinde Finansal Analiz Tekniklerinin Kullanımı Üzerine Bir Araştırma, *İşletme ve İktisat Çalışmaları Dergisi*, 6(2), 1-14.
- Feng, C. M., & Wang, R. T. (2000). Performance Evaluation for Airlines Including the Consideration Of Financial Ratios, *Journal of Air Transport Management*, 6(6), 133-142.
- Gerede, E. (2015). Havayolu Taşımacılığı ve Ekonomik Düzenlemeler Teori ve Türkiye Uygulaması. Art Ofset Matbaacılık, Ankara.
- Gümüş, U. T., & Bolel, N. (2017). Rasyo Analizleri ile Finansal Performansın Ölçülmesi: Borsa İstanbul'da Faaliyet Gösteren Havayolu Şirketleri'nde Bir Uygulama, *Adnan Menderes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 4(2). 87-96.
- Karami, A., & Johansson, R. (2014). Utilization Of Multi Attribute Decision Making Techniques To Integrate Automatic and Manual Ranking of Options, *Journal Of Information Science and Engineering*, 30: 519-534.
- Kaya, A., & Kendirli, S. (2010). Havayolu Şirketlerinde Finansal Bir Araç Olarak Hedging Yönteminin Kullanılması, *MANAS Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 7(4), 113-126.
- Kıracı, K., & Asker, V. (2019). Etkinlik ve Etkinliği Belirleyen Faktörler: Havayolu Şirketleri Üzerine Ampirik Bir İnceleme, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi*, 14(1), 25-50.
- Kıracı, K., & Bakır, M. (2019). CRITIC Temelli EDAS Yöntemi ile Havayolu İşletmelerinde Performans Ölçümü Uygulaması, *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 35, 157-174.
- Ömürbek, V., & Kınay, B. (2013), Havayolu Taşımacılığı Sektöründe TOPSIS Yöntemiyle Finansal Performans Değerlendirmesi, *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 18(3), 343-363.
- Özbek, A., & Engür, M. (2018). EDAS Yöntemi ile Lojistik Firma Web Sitelerinin Değerlendirilmesi, *Selçuk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu Dergisi*, Sayı 2, S. 417-429.
- Özbek, A. (2019). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ve Excel ile Problem Çözümü, *Seçkin Yayınevi*, 2. Baskı, Ankara.
- Perçin, S., & Aldalou, E. (2018). Financial Performance Evaluation of Turkish Airline Companies Using Integrated Fuzzy AHP Fuzzy TOPSIS Model, *International Journal of Economic and Administrative Studies*, 18. EYI Special Issue, 583-598.
- Safaei Ghadikolaei, A., Khalili Esbouei, S., & Antuchevicien, J. (2014). Applying Fuzzy MCDM For Financial Performance Evaluation of Iranian Companies, *Technological and Economic Development of Economy*, 20(2), 274-291.
- Sakız, B. (2017). Finansal Oranlar Kullanılarak Risk Yönetimi ve Havayolu Sektörü-Bir Uygulama, *International Conference On Eurasian Economies*, 282-290.
- Teker, D., Teker, S., & Güner, A. (2016). Financial Performance of Top 20 Airlines, *Procedia -Social and Behavioral Sciences*, 235, 603-610.
- Wang, T.C., & Lee, H.D. (2009). Developing A Fuzzy Topsis Approach Based On Subjective Weights And Objective Weights, *Expert Systems With Applications*, 36 (5): 8980-8985
- Wang, Y. J., & Kao, C. S. (2009). A Fuzzy Multi-Criteria Group Decision-Making Model For The Financial Performance Evaluation of Airlines, *Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 3, 193-197.
- Wang, Y.-J. (2008). Applying FMCDM To Evaluate Financial Performance of Domestic Airlines in Taiwan, *Expert Systems with Applications*, 34(3), 1837-1845.
- Wanke, P., Barros, C. P., & Chen, Z. (2015). An Analysis of Asian Airlines Efficiency with Two Stage TOPSIS and MCMC Generalized Linear Mixed Models, *International Journal of Production Economics*, 169, 110-126
- Wu, J., Sun, J., Liang, L., & Zha Y. (2011). Determination of Weights for Ultimate Cross Efficiency Using Shannon Entropy, *Expert Systems with Applications*, 38 (5): 5162-5165.
- Zhang, H., Gu, C., Gu, L., & Zhang, Y. (2011). The Evaluation of Tourism Destination Competitiveness by TOPSIS & Information Entropy - A Case in The Yangtze River Delta of China, *Tourism Management*, 32: 443-451

Ek:

Tablo 8: Havayolu Şirketlerinin 2009 Yılı Mali Verileri

	Cari oran	Asit test oranı	Nakit oranı	Aktif devir hızı	Alacak devir hızı	Duran varlıklar devir hızı	Finansal kaldıraç oranı	Özsermaye karlılığı	Aktif karlılığı	Faaliyet kar marjı	Brüt kar marjı	Net kar marjı
Air France	0,710	0,660	0,330	0,830	11,760	1,160	0,800	0,140	0,030	0,000	0,070	0,030
Easyjet	1,400	1,400	0,740	0,590	8,890	0,980	0,640	0,050	0,020	0,030	0,190	0,030
Lufthansa	0,570	0,570	0,030	74,000	27,970	0,790	0,820	0,040	0,010	0,020	0,070	0,010
Ryanair	1,840	1,840	1,150	0,370	56,080	0,610	0,620	0,070	0,030	0,040	0,020	0,070
THY	1,440	1,360	0,560	0,820	15,850	1,220	0,600	0,160	0,070	0,100	0,260	0,080

Tablo 9: Havayolu Şirketlerinin 2010 Yılı Mali Verileri

	Cari oran	Asit test oranı	Nakit oranı	Aktif devir hızı	Alacak devir hızı	Duran varlıklar devir hızı	Finansal kaldıraç oranı	Özsermaye karlılığı	Aktif karlılığı	Faaliyet kar marjı	Brüt kar marjı	Net kar marjı
Air France	0,770	0,710	0,360	0,760	9,800	1,060	0,800	0,290	0,060	0,080	0,020	0,070
Easyjet	1,420	1,420	0,860	0,600	12,380	0,970	0,630	0,080	0,030	0,070	0,280	0,050
Lufthansa	0,640	0,630	0,040	0,740	26,940	1,030	0,790	0,120	0,030	0,100	0,110	0,040
Ryanair	1,980	1,970	0,950	0,310	52,480	0,520	0,620	0,110	0,040	0,170	0,130	0,130
THY	1,370	1,310	0,320	0,790	14,570	1,180	0,650	0,080	0,030	0,060	0,210	0,030

Tablo 10: Havayolu Şirketlerinin 2011 Yılı Mali Verileri

	Cari oran	Asit test oranı	Nakit oranı	Aktif devir hızı	Alacak devir hızı	Duran varlıklar devir hızı	Finansal kaldıraç oranı	Özsermaye karlılığı	Aktif karlılığı	Faaliyet kar marjı	Brüt kar marjı	Net kar marjı
Air France	0,700	0,640	0,250	0,890	13,730	1,170	0,780	0,130	0,030	0,020	0,060	0,030
Easyjet	1,480	1,480	0,930	0,760	20,540	1,240	0,620	0,130	0,050	0,080	0,220	0,070
Lufthansa	0,480	0,470	0,030	0,840	26,940	1,070	0,810	0,030	0,010	0,050	0,090	0,010
Ryanair	1,890	1,890	1,100	0,330	55,890	0,550	0,660	0,130	0,040	0,170	0,130	0,130
THY	1,020	0,960	0,390	0,720	15,440	0,960	0,730	0,001	0,001	0,010	0,170	0,070

Tablo 11: Havayolu Şirketlerinin 2012 Yılı Mali Verileri

	Cari oran	Asit test oranı	Nakit oranı	Aktif devir hızı	Alacak devir hızı	Duran varlıklar devir hızı	Finansal kaldıraç oranı	Özsermaye karlılığı	Aktif karlılığı	Faaliyet kar marjı	Brüt kar marjı	Net kar marjı
Air France	0,770	0,720	0,350	0,950	13,680	1,330	0,860	0,340	0,050	0,030	0,060	0,050
Easyjet	1,050	1,050	0,510	0,880	15,740	1,280	0,580	0,140	0,060	0,090	0,220	0,070
Lufthansa	0,550	0,540	0,080	0,770	31,800	1,050	0,810	0,150	0,030	0,100	0,070	0,040
Ryanair	2,140	2,130	1,490	0,390	60,040	0,680	0,630	0,170	0,060	0,190	0,140	0,160
THY	0,860	0,800	0,300	0,790	19,100	0,990	0,710	0,210	0,060	0,110	0,210	0,080

Tablo 12: Havayolu Şirketlerinin 2013 Yılı Mali Verileri

	Cari oran	Asit test oranı	Nakit oranı	Aktif devir hızı	Alacak devir hızı	Duran varlıklar devir hızı	Finansal kaldıraç oranı	Özsermaye karlılığı	Aktif karlılığı	Faaliyet kar marjı	Brüt kar marjı	Net kar marjı
Air France	0,730	0,680	0,340	1,000	14,380	1,460	0,910	0,790	0,070	0,001	0,080	0,070
Easyjet	1,050	1,050	0,730	0,950	21,620	1,410	0,540	0,200	0,090	0,120	0,250	0,090
Lufthansa	0,490	0,490	0,100	0,700	30,360	0,910	0,790	0,090	0,010	0,060	0,050	0,030
Ryanair	1,970	1,970	0,650	0,430	68,090	0,740	0,630	0,170	0,060	0,190	0,100	0,150
THY	0,680	0,630	0,200	0,740	16,360	0,900	0,730	0,100	0,030	0,080	0,180	0,040

Tablo 13: Havayolu Şirketlerinin 2014 Yılı Mali Verileri

	Cari oran	Asit test oranı	Nakit oranı	Aktif devir hızı	Alacak devir hızı	Duran varlıklar devir hızı	Finansal kaldıraç oranı	Özsermaye karlılığı	Aktif karlılığı	Faaliyet kar marjı	Brüt kar marjı	Net kar marjı
Air France	0,610	0,560	0,270	1,070	14,420	1,550	1,030	0,330	0,001	0,030	0,080	0,001
Easyjet	0,890	0,890	0,300	0,100	22,310	1,390	0,520	0,210	0,100	0,130	0,260	0,100
Lufthansa	0,260	0,250	0,040	0,700	24,080	0,830	0,830	-0,210	-0,040	0,060	0,020	0,050
Ryanair	1,510	1,720	0,760	0,430	65,230	0,710	0,630	0,160	0,060	0,170	0,050	0,140
THY	0,770	0,720	0,170	0,760	22,850	0,950	0,710	0,190	0,050	0,070	0,180	0,080

Tablo 14: Havayolu Şirketlerinin 2015 Yılı Mali Verileri

	Cari oran	Asit test oranı	Nakit oranı	Aktif devir hızı	Alacak devir hızı	Duran varlıklar devir hızı	Finansal kaldıraç oranı	Özsermaye karlılığı	Aktif karlılığı	Faaliyet kar marjı	Brüt kar marjı	Net kar marjı
Air France	0,630	0,580	0,260	1,100	14,270	1,630	0,990	0,470	0,001	0,040	0,100	0,001
Easyjet	0,720	0,720	0,370	0,960	22,410	1,300	0,530	0,240	0,110	0,150	0,290	0,120
Lufthansa	0,240	0,230	0,040	0,690	35,950	0,830	0,800	0,230	0,050	0,100	0,140	0,070
Ryanair	1,720	1,720	0,350	0,350	70,880	0,660	0,670	0,210	0,070	0,240	0,120	0,200
THY	0,810	0,760	0,230	0,600	27,360	0,750	0,700	0,210	0,060	0,100	0,200	0,100

Tablo 16: Havayolu Şirketlerinin 2016 Yılı Mali Verileri

	Cari oran	Asit test oranı	Nakit oranı	Aktif devir hızı	Alacak devir hızı	Duran varlıklar devir hızı	Finansal kaldıraç oranı	Özsermaye karlılığı	Aktif karlılığı	Faaliyet kar marjı	Brüt kar marjı	Net kar marjı
Air France	0,750	0,690	0,390	1,080	13,300	1,620	0,940	0,610	0,030	0,040	0,130	0,030
Easyjet	0,920	0,920	0,460	0,840	22,380	1,130	0,510	0,160	0,080	0,110	0,260	0,100
Lufthansa	0,280	0,270	0,050	0,560	31,390	0,700	0,780	0,210	0,050	0,160	0,100	0,080
Ryanair	1,430	1,430	0,370	0,440	75,140	0,780	0,680	0,430	0,140	0,290	0,170	0,310
THY	0,800	0,750	0,320	0,450	22,090	0,560	0,720	0,001	0,001	0,010	0,120	0,001

Tablo 17: Havayolu Şirketlerinin 2017 Yılı Mali Verileri

	Cari oran	Asit test oranı	Nakit oranı	Aktif devir hızı	Alacak devir hızı	Duran varlıklar devir hızı	Finansal kaldıraç oranı	Özsermaye karlılığı	Aktif karlılığı	Faaliyet kar marjı	Brüt kar marjı	Net kar marjı
Air France	0,750	0,710	0,390	0,860	11,950	1,240	0,920	0,070	0,001	0,001	0,160	0,000
Easyjet	1,040	1,040	0,430	0,680	14,770	0,960	0,530	0,110	0,050	0,100	0,300	0,080
Lufthansa	0,310	0,310	0,060	0,530	36,070	0,690	0,730	0,320	0,090	0,210	0,130	0,160
Ryanair	1,560	1,560	0,410	0,410	89,650	0,670	0,630	0,300	0,110	0,320	0,160	0,270
THY	0,850	0,800	0,440	0,580	17,810	0,720	0,710	0,030	0,010	0,110	0,200	0,020

Tablo 18: Havayolu Şirketlerinin 2018 Yılı Mali Verileri

	Cari oran	Asit test oranı	Nakit oranı	Aktif devir hızı	Alacak devir hızı	Duran varlıklar devir hızı	Finansal kaldıraç oranı	Özsermaye karlılığı	Aktif karlılığı	Faaliyet kar marjı	Brüt kar marjı	Net kar marjı
Air France	0,630	0,580	0,290	0,910	12,100	1,250	0,940	0,220	0,010	0,050	0,130	0,020
Easyjet	0,970	0,970	0,500	0,670	11,550	0,940	0,540	0,110	0,050	0,100	0,330	0,080
Lufthansa	0,250	0,240	0,060	0,530	24,420	0,650	0,710	0,040	0,010	0,190	0,100	0,020
Ryanair	1,230	1,230	0,440	0,420	89,130	0,630	0,640	0,320	0,120	0,320	0,170	0,280
THY	0,870	0,830	0,320	0,580	20,940	0,740	0,710	0,130	0,040	0,120	0,220	0,060



Bir Isı Borusunun Akış ve Isı Transfer Karakteristiklerinin Sayısal Olarak İncelenmesi

Numerical Investigation of Flow and Heat Transfer Characteristics of a Heat Pipe

Mevlüt Emre Aslantaş¹ , Tolga Demircan^{1*} 

¹ Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 12/02/2021

Kabul / Accepted: 08/03/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 23/05/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Bu çalışmada ısı kontrol uygulamalarında önemli bir yere sahip olan bir ısı borusunun ısı ve akış karakteristikleri incelenmiştir. Isı borusunun yoğunlaştırıcı bölüm ve orta adyabatik bölüm uzunluklarının birbirine oranı (L_c/L_{a1}) sırasıyla 0,5, 1, 1,25 ve 2 olacak şekilde değiştirilerek dört farklı model geometri oluşturulmuştur. Bu model geometriler için, ısı girdileri 10W ile 80W arasında, doluluk oranı ise %40 ile %80 arasında değiştirilerek Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği aracılığı ile sayısal analizler yapılmıştır. Bu kapsamda, iki fazlı akış yaklaşımı ile zamana bağlı çözümler yapılmış, ısı borusu içindeki akışın sıcaklık ve hız dağılımları belirlenmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada incelenen parametre aralığında, model geometrinin yoğunlaştırıcı kısmının uzunluğunun artırılmasının ısı performansı olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca farklı doluluk oranları arasında %50 doluluk oranının optimum ısı performans sergilediği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Isı borusu, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), İki fazlı akış, Isı Transferi”

Abstract

In this study, the thermal and flow characteristics of a heat pipe, which has an important place in thermal control applications, have been investigated. Four different model geometries were created by changing the ratio of the lengths of the condenser section and the middle adiabatic section (L_c / L_{a1}) of the heat pipe. This ratio has been changed to be 0.5, 1.0, 1.25 and 2.0. For these model geometries, the heat inputs were changed between 10W and 80W, and the occupancy rate between 40% and 80%. Numerical analyzes were made through Computational Fluid Dynamics. In this context, time-dependent solutions are made with the two-phase flow approach. The temperature and velocity distributions of the flow in the heat pipe are determined. As a result, it has been observed that increasing the length of the condenser section of the model geometry has a positive effect on the thermal performance in the parameter range examined in this study. In addition, it was determined that 50% occupancy rate showed optimum thermal performance among different occupancy rates.

Key Words

“Heat pipe, Computational Fluid Dynamics (CFD), Two phase flow, Heat transfer”

Semboller ve Kısaltmalar

A	Isı transfer alanı (m^2)	\vec{v}	Hız (m/s)
c_p	Özgül ısı kapasitesi ($J/kg.K$)	α	Hacimsel oran
D	Isı borusu çapı (mm)	μ	Dinamik viskozite
E	İç enerji (kJ/kg)	ρ	Yoğunluk
g	Yer çekim ivmesi (m/s^2)	ε	Türbülans kinetik enerjisinin yayılma hızı
L	Uzunluk (mm)	k	Isı iletim katsayısı
P	Basınç (Pa)	b	Buhar
R	Isıl direnç (K/W)	eff	Efektif
Q	Isı (W)	L_a	Adyabatik bölüm uzunluğu
$S_{m,b}$	Buhar kütle kaynak terimi (W/m^3)	L_c	Yoğuşturucu bölüm uzunluğu
$S_{m,s}$	Sıvı kütle kaynak terimi (W/m^3)	L_e	Buharlaştırıcı bölüm uzunluğu
S_h	Gizli ısı kaynağı ($kg/m^3.s$)	L_e	Buharlaştırıcı bölüm uzunluğu
t	Zaman (s)	S	Sıvı
T	Sıcaklık (K)		

1. Giriş

Günümüzde uzay, haberleşme, savunma vb. birçok önemli sektörde, bilgisayar ve benzeri elektronik devre işlemcilerinin ısı kontrolünde, iklimlendirme uygulamalarında, güneş kolektörleri gibi alanlarda sıklıkla ısı boruları kullanılmaktadır. Isı boruları, küçük boyut ve hafif ağırlıkta olmalarına rağmen ısı transferinde etkili olmalarından dolayı özellikle uzay alanındaki uygulamalar da öne çıkmaktadırlar. Isı transferinde sağladığı önemli performans, ısı borularının geniş bir kullanım alanı bulmasına sebep olmuş ve günümüze kadar gelişen ve yenilikçi teknoloji ile birçok farklı şekil ve forma dönüşmüştür. Elektronik devre elemanları, küçük bir hacim içinde sürekli ısı üretimi oluşturmada ve çok yüksek sıcaklıklara ulaşabilmektedir. Bu yüksek sıcaklıklar, elektronik devre elemanının bulunduğu elektronik sisteme ciddi hasarlara neden olabilmektedir. Dolayısıyla elektronik bileşenlerin ve sistemlerin, çalışma devamlılığının korunabilmesi için, ısı enerjisinin çevreye verimli bir şekilde aktarılması ve sistemlerin güvenli çalışma sıcaklıklarına indirilmeleri gerekmektedir (Wang ve ark. 2015, Xie ve ark. 2020). Bu sebeple, bilgisayarların soğutulmasından uzay araçlarının termal kontrolüne kadar birçok uygulamada, sistemi soğutma ve güvenli çalışma sıcaklıklarında tutma işlemi için ısı boruları kullanılmaktadır.

Pratik uygulamalarda birçok farklı ısı borusu konfigürasyonu olduğu görülmektedir. Bu konfigürasyonlar ısı borularının geometrik özellikleri ve çalışma parametreleri farklılaştırılarak oluşturulmaktadır. Bir ısı pompasının tasarımı, fiziksel boyutlar, kanatçık eklentileri, tüp malzemesi, dönüş sayısı vb. gibi fiziksel parametreleri; tahliye basıncı, eğim, doluluk oranı, ısı girdisi vb. gibi çalışma parametrelerini içerebilmektedir. Ayrıca geleneksel çalışma akışkanları (su, metil alkol, etil alkol vb.) ve geleneksel olmayan çalışma akışkanları (nanoakışkanlar, soğutucu akışkanlar, vb.) gibi parametreleri barındırmaktadır. Özellikle son yıllarda, çeşitli çalışmalarda ısı borusunun içine fitilli bir yapı eklentisi ve çalışma akışkanı olarak geleneksel olmayan nano akışkan kullanımı üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmalar, geleneksel olmayan akışkan kullanımının ısı borusunun termal performansını etkilediğini göstermiştir. Günümüzde araştırmacılar, mikroelettronik teknolojisinin hızlı gelişmesi ve bu mikroelettronik devrelerin ısı kontrolünde harici bir mekanik güç girişine ihtiyaç duyulmaması sebebiyle, ısı borusu çalışmaları üzerine yoğunlaşmışlardır.

Literatür incelendiğinde, birçok araştırmacının (Çalışır ve ark. 2017, Wu ve ark. 2019, Masip ve ark. 2020, Kilic 2018 vb.) yüksek sıcaklıklara ulaşan sistemlerin soğutulması için çapraz akışla soğutma, çarpan jetle soğutma vb. alternatif soğutma yöntemlerinin üzerinde çalıştıkları görülmüştür. Bu alternatif soğutma çalışmalarında, farklı geometriler ve farklı çalışma parametrelerinin üzerine yoğunlaşıldığı gözlemlenmiştir. Özellikle son yıllarda, nano partikül eklenmiş soğutucu akışkan kullanımının ısı transferini artırma özelliğinden faydalanan birçok yeni çalışmanın (Mahdavi ve ark. 2020, Ho ve ark. 2021, Kilic ve Muhammad 2018, Al-Rashed ve ark. 2016 vb.) yapıldığı görülmektedir. Ancak tüm bu soğutma yöntemlerinde fan benzeri ekstra sistem elemanlarına ihtiyaç duyulması bir dezavantaj oluşturmaktadır. Isı boruları yardımıyla yapılan soğutma da, sistem geometrisi çok basittir ve ekstra sistem elemanlarına ihtiyaç duyulmamaktadır. Isı boruları üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, ilk çalışmaların 1960'lı yıllarda başladığı ve günümüze kadar birçok önemli çalışma yapıldığı gözlemlenmiştir. Yapılan bu çalışmalarda, incelenen ısı borusundaki basınç ve sıcaklık dağılımının belirlenmesi, optimum ısı borusu geometrisinin belirlenmesi ve ısı transfer performansının geliştirilmesi üzerine yoğunlaşıldığı görülmektedir. Bu kapsamda, ısı borusu çapı, dönüş sayısı, doluluk oranı, ısı girdisi ve kullanılan akışkan tipi gibi parametrelerin değiştirilerek çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Literatürde bulunan çalışmalardan bir kısmı aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

Pachghare ve ark. (2014) ısı borularının ısı performans optimizasyonunun üzerine deneysel olarak çalışmışlardır. Çalışmalarında bakırdan yapılmış kapalı döngü titreşimli bir ısı borusunu (CLPHP) ele almışlardır. Bu kapsamda 20W ile 60W arasında değişen ısı girdilerinde, çalışma akışkanını su, etanol, metanol, aseton, su-etanol, su-metanol ve su-aseton olarak değiştirilerek ısı performansındaki etkileri incelemişlerdir. Deneylerinin sonucunda termal direncin, 40W ısı girişine kadar sorunsuz bir şekilde azaldığını, ardından sabit kaldığını belirlemişlerdir. Su-aseton karışımı çalışma sıvısının, ısı borusunda kullanılan diğer çalışma sıvılarının

kullanımına göre ısı performans bakımından üstün olduğu sonucuna varmışlardır. Baitule ve ark. (2013) iki tur kapalı döngülü titreşimli bir ısı borusunun ısı performans optimizasyonunu üzerine deneysel olarak çalışmışlardır. Kılcal bakır ısı boru üzerinde geçici ve sabit durum deneylerini gerçekleştirmişlerdir. 10W ile 100W arasında değişen farklı ısı girdileri ve % 0 ile % 100 arasında değişen farklı doluluk oranları için çalışmışlardır. Çalışma akışkanları olarak su, etanol, metanol ve aseton kullanmışlardır. Bu deneysel çalışmalar sonucunda, düşük ısı direnç ve yüksek ısı transfer katsayısı olduğunda, % 60 doluluk oranında daha iyi ısı transfer özellikleri gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Rahman ve ark. (2015) çalışmalarında, bakırdan yapılmış kapalı, 8 döngülü, titreşimli bir ısı borusunu (CLPHP) incelemişlerdir. Bu kapsamda, 0°, 30° ve 45° eğim açısına sahip kanatlı ve kanatsız ısı borusu geometrilerinin ısı transfer performansları üzerine yoğunlaşmışlardır. Sonuç olarak, çalışma akışkanı olarak etanol kullanımı, % 50 doluluk oranı ve yoğunlaştırıcı bölümünde dikey pozisyonda kanatçık kullanımı durumunda, ısı borusunun daha iyi bir performans gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Naik ve ark. (2012) tek tur kapalı titreşimli bakır bir ısı borusu için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Deneylerini hem yatay hem de düşey yönlerde, % 60 ve % 80 farklı doluluk oranları ve ısı girdisi 9-15W arasında değişen koşullar için tekrarlamışlardır. Çalışma akışkanı olarak aseton, metanol ve etanol kullanmışlardır. Sonuç olarak, çalışma akışkanı olarak aseton kullanıldığı, doluluk oranı % 60 olduğu durumda, daha düşük ısı direnç ve daha yüksek ısı transfer katsayısına ulaşıldığını gözlemlemişlerdir.

Clement ve ark. (2011), bakırdan yapılmış çapı 1,375 mm olan ve 15 turdan oluşan bir titreşimli ısı borusu üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu kapsamda, çalışma akışkanı aseton, metanol ve su için, doluluk oranını % 30-70 aralığında, ısı girdilerini ise 80 ile 180 W arasında değiştirerek deneylerini tekrarlamışlardır. Bu çalışmanın sonucunda, metanolün % 60 doluluk oranıyla aseton ve etanol ile karşılaştırıldığında daha iyi bir ısı performans sergilediğini belirtmişlerdir. Geometrik yapının değiştirilmesinin, ısı borularında ısı transferi iyileştirmek için etkili bir yöntem olduğu Wang ve ark. (2018) ile Fertahi ve ark. (2018) tarafından vurgulanmıştır. Wang ve ark. (2018), titreşimli bir ısı borusu içerisindeki termal ve hidrodinamik davranışları analiz etmek için tasarladıkları bir ısı borusu üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalarında, ısı borusunun ısı performansını ANSYS-Fluent paket programını kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak, buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı konfigürasyonunda, kısmen yatay yapıya sahip ısı borusunun kullanımının termal performansın artmasında etkili olduğunu belirtmişlerdir. Fertahi ve ark. (2018), kapalı döngülü bir ısı borusunun termal performansını ve akış özelliklerini sayısal olarak analiz etmek için CFD simülasyonu gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, ısı borusunun içindeki akış yapısında düzensizlik yaratmak için, kesit değişimi (boru çapında daralmalar veya genişlemeler) veya kanatçıklar gibi çeşitli ısı transferi iyileştirmeleri yapılarak bir model oluşturmuşlardır. ANSYS-Fluent paket programını kullanarak ısı performansını sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, yoğunlaştırıcı bölümünde eğimli kanatçık kullanımının ısı performansını artırdığını gözlemlemişlerdir. Kumaer (2019), mikro kanallı yapıya sahip bir ısı borusu içerisindeki akış ve ısı performans optimizasyonunu belirlemek için yarı dairesel, dikdörtgen ve trapez tipteki mikro kanallı ısı borusu üzerinde deneysel ve sayısal olarak çalışmıştır. Sonuç olarak, trapez şekilli mikro kanalda ısı transferinin yaklaşık olarak % 12 arttığını gözlemlemiş ve sayısal çalışmasının sonuçlarını deneysel sonuçlar ile karşılaştırarak doğrulamıştır.

Pouryoussefi ve ark. (2017), buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı için sırasıyla 100–180 °C ve 20–50 °C aralığında 2 boyutlu kapalı döngü titreşimli bir ısı borusundaki akışı sayısal olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında Lyapunov üssü teorisini kullanmışlardır. Sonuçlarında Lyapunov üssünün, çoğunlukla düşük doluluk oranı için sıcaklığın artmasıyla yükseldiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca sonradan eklenen doluluk oranı ile bu pozitif değere karşılık gelen sıcaklık aralıklarının arttığını göstermişlerdir. Wang ve ark. (2020), çalışmalarında farklı ıslatabilirliğe sahip su ile doldurulmuş 3 boyutlu bir ısı borusunu sayısal olarak incelemişlerdir. Çeşitli ısı girişlerinde elde edilen termal performans verilerinin, hem yüzey ıslatabilirliğinden hem de ısı giriş yüklerinden etkilendiği kanaatine varmışlardır. Düşük ısı akısı altında hidrofobik yüzeye sahip olan ısı borusunun hidrofilik yüzeye sahip olanlara göre daha düşük termal dirence sahip olduğunu belirtmişlerdir. Tersine durumda ise yüksek ısı akısı altında hidrofobik yüzeye sahip olan ısı borusunun hidrofobik yüzeye sahip olana göre daha iyi ısı performansına sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Gupta ve ark. (2019), sayısal çalışmalarında su ve CeO₂/H₂O nano-akışkanını çalışma akışkanı olarak kullanmışlardır. %0,5, 1,0, ve 1,5 olmak üzere farklı hacimsel konsantrasyon oranları ve 10, 15 ve 20 kW/m² olmak üzere farklı ısı akıları için 2 boyutlu simülasyonlar yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda CeO₂/H₂O nano-akışkan kullanılan ısı borusunun, su kullanılabildiği göre daha iyi ısı performans sergilediğini belirlemişlerdir.

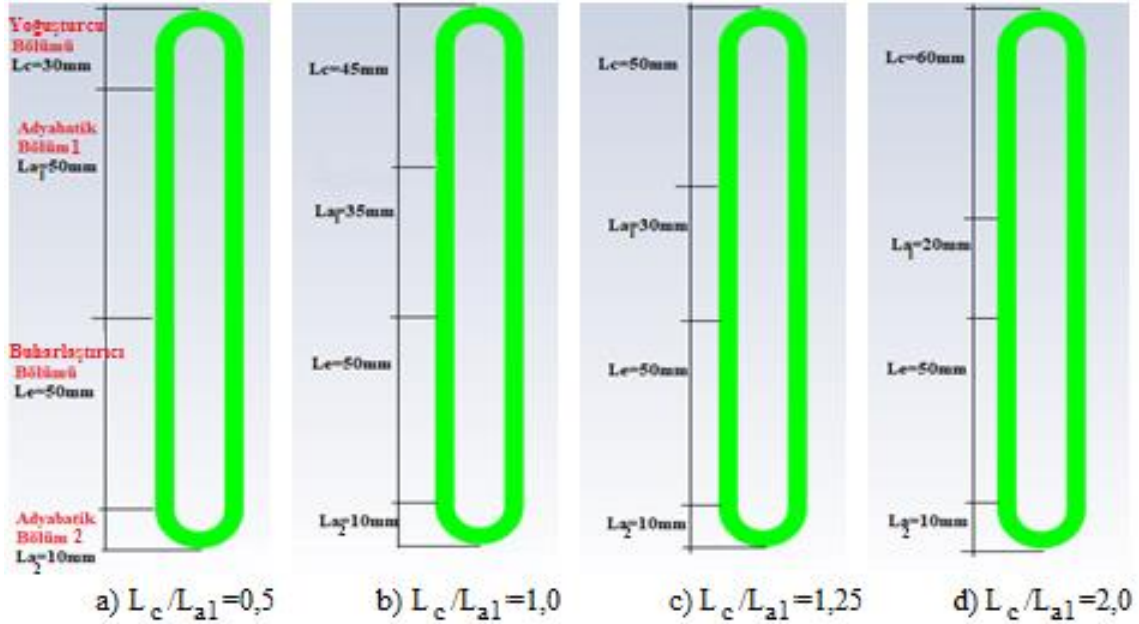
Yukarıda ki çalışmalardan da görüldüğü üzere, ısı boruları termal kontrol sistemlerinde önemli bir rol üstlenmektedir. Ayrıca ısı transferinin olduğu birçok mühendislik uygulamasında karşımıza çıkabilmektedir. Bundan dolayı bu çalışmada, bir ısı borusunun ısı performansını etkileyen önemli parametrelerden olan geometrik boyutlar, sınır şartları ve doluluk oranları değiştirilerek incelemeler yapılmıştır. Bu kapsamda bir ısı borusu, buharlaştırıcı bölümü, adyabatik bölüm ve yoğunlaştırıcı bölümü olmak üzere 3 farklı bölüme ayrılmış, bu bölümlerin farklı uzunlukları, ısı borusunun farklı doluluk oranları ve farklı ısı girdileri için analizler yapılmıştır. Bu parametrelerin ısı borularının ısı performansına olan etkileri irdelenmiş ve incelenen ısı borusunun optimum çalışma şartları tayin edilmeye çalışılmıştır.

2. Model Geometrisi ve Matematiksel Formülasyon

2.1. Fiziksel Model ve Sistem Açıklaması

Bu çalışmada kapalı döngülü bir ısı borusu modeli kullanılmıştır. Bu kapsamda incelenen ısı borusu için geliştirilen model geometrilerinin, temel bölümleri ve geometrik boyutları Şekil 1'de şematik olarak verilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere incelenen ısı borusu bir buharlaştırıcıdan, bir yoğunlaştırıcıdan ve iki adet adyabatik bölümden oluşmaktadır. Isı borusunun temel bölümleri olan yoğunlaştırıcı bölümünün, adyabatik bölümlerin ve buharlaştırıcı bölümünün uzunlukları değiştirilerek dört temel model geometri

oluşturulmuştur. Bu kapsamda, buharlaştırıcı bölümün uzunluğu sabit tutularak, yoğunlaştırıcı ve adyabatik bölümün farklı uzunlukları için incelemeler yapılmıştır. Yoğuşturucu bölüm ve orta adyabatik bölüm uzunluklarının birbirine oranı (L_c/L_{a1}) sırasıyla 0,5, 1, 1,25 ve 2 olacak şekilde değiştirilerek model geometriler oluşturulmuştur.



Şekil 1. Model geometrilerin şematik olarak gösterimi a)Model 1 b)Model 2 c)Model 3 d)Model 4

2.2. Matematiksel Formülasyon

Bu çalışmada iki fazlı akış için akışkan hacmi modeli (volume of fluid, VOF) kullanılarak incelemeler yapılmıştır. Bu kapsamda, akış içinde bulunan sıvı faz ile buhar fazın hacimsel oranı aşağıda ki gibi ifade edilmiştir. Burada α_b ve α_s sırasıyla akış içerisinde bulunan buhar fazın ve sıvı fazın hacimsel oranını temsil etmektedir. (Xie ve ark., 2020, Wang ve ark., 2015)

$$\alpha_b + \alpha_s = 1 \quad (1)$$

Akış içinde bulunan sıvı faz ve buhar faz için kütle korunumu denkleminin genel formu ayrı ayrı yazılabilir. Bu denklemlerde, S ve ρ terimleri sırasıyla ilgili fazın kaynak terimini ve yoğunluğunu temsil etmektedir. (Xie ve ark., 2020, Wang ve ark., 2015)

$$\frac{\partial \alpha_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_s \vec{v}) = \frac{S_{m,s}}{\rho_s} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha_b}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_b \vec{v}) = \frac{S_{m,b}}{\rho_b} \quad (3)$$

Sıvı hacmi modeline göre, momentum denkleminin genel formu ise aşağıda ki gibi yazılabilir (Xie ve ark., 2020, Wang ve ark., 2015). Burada ρ akışın ortalama yoğunluğunu, F ise yüzey gerilimini temsil etmektedir. F değeri, akışın buhar faz ve sıvı fazının hacimsel oranları ve yoğunluklarına bağlı olarak belirlenir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla[\mu(\nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4)$$

İki fazdan oluşan akışın enerji denkleminin genel hali ise aşağıda verilmiştir (Xie ve ark., 2020, Wang ve ark., 2015). Burada E, P, λ_{eff} ve S_h terimleri sırasıyla akışın iç enerjisi, basıncını, efektif ısı iletkenliğini ve kaynak terimini temsil etmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + P)) = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T) + S_h \quad (5)$$

Kullanılan türbülans denklemlerinin genel hali ise aşağıdaki gibidir (Xie ve ark., 2020).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_\varepsilon\mu_{eff}\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right) + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (7)$$

Isı borularının ısı kapasitesi genellikle ısı direnç ile tahmin edilir. Eşdeğer termal direnç, yoğuşturucu ile buharlaştırıcı arasındaki ortalama sıcaklık farkının termal yüklerle bölünmesiyle elde edilir. Bu nedenle, eşdeğer ısı direnç R_{th} aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir.

$$R_{th} = \frac{T_b - T_y}{Q_{giren}} \quad (8)$$

2.3. Sınır Şartları

Yukarıda verilen diferansiyel denklemlerin sayısal olarak çözülebilmesi için sınır şartlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada incelenen ısı borusunun yoğuşturucu bölümü, adyabatik bölümleri ve buharlaştırıcı bölümünün yüzeylerine uygulanan sınır şartları aşağıda verilmiştir.

Buharlaştırıcı bölümünün yüzeylerine sabit ısı akısı sınır şartı uygulanmıştır.

$$-k\frac{\partial T}{\partial n} = q'' \quad (9)$$

Burada ısı akısı q'' aşağıdaki formül aracılığı ile hesaplanabilmektedir.

$$q'' = \frac{Q_{giren}}{A_{buharlaştırıcı}} \quad (10)$$

Adyabatik bölümlerin yüzeylerinin yalıtıldığı ve adyabatik sınır şartı uygulandığı varsayılmıştır

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (11)$$

Yoğuşturucu bölümünün yüzeylerine ise sabit 300 K sıcaklık sınır şartı uygulandığı düşünülmüştür.

$$T_{yoğuşturucu} = 300 \text{ K} \quad (12)$$

Diferansiyel denklemler zamana bağlı olarak çözüleceğinden dolayı, başlangıç sınır şartı olarak sabit 293,15 K sıcaklık ve negatif çalışma basıncı uygulanmıştır.

2.4. Sayısal Çözüm Yöntemi

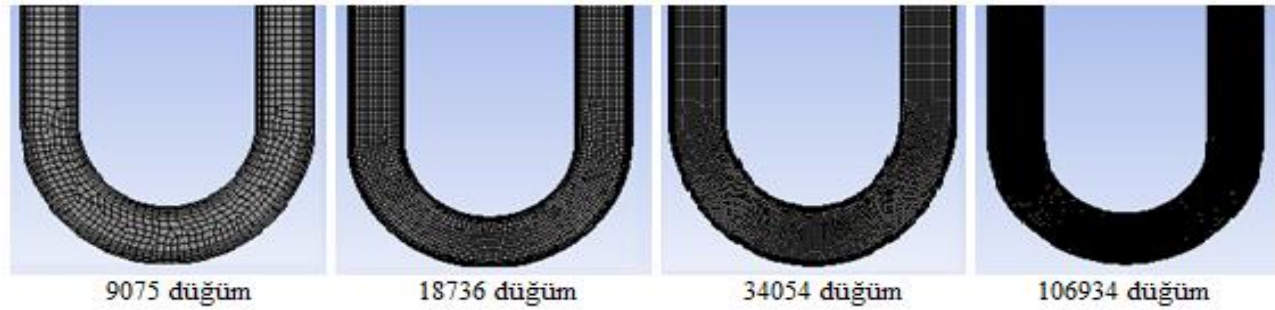
Bir ısı borusunun ısı performansını önemli derecede yükseltebilmek için, ısı direncinin düşürülmesi gerekmektedir. Bunu sağlamanın bir yolu, farklı konfigürasyonlara sahip ısı borusu tasarımlarının deneysel düzenekler ile test edilerek optimum tasarım parametrelerinin belirlenmesidir. Bu kapsamda, güvenilir sonuçların bulunması açısından bu parametrelerin sonuca etkisinin hem eş zamanlı hem de birbirinden bağımsız olarak araştırılması gerekmektedir. Mümkün olabilecek tüm konfigürasyonların deneysel olarak test edilmesi hem zaman hem de maliyet açısından uygulanabilir olmadığından, bu çalışma kapsamında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği prensibine dayanan sayısal yöntem ile çözüm yapılmıştır. Bu kapsamda, kullanılan sayısal çözüm yöntemi için aşağıda verilen sayısal metodoloji dikkate alınmıştır.

Bu çalışmada, incelenen ısı borusu içinde ki akış su ve su buharı olmak üzere iki fazdan oluşmaktadır. Bu fazların birbirine oranı ise zamanla anlık olarak değişiklik göstermektedir. Bu iki fazlı akışın sayısal olarak modellenmesi için, akışkan hacmi (Volume of Fluid, VOF) modeli kullanılmıştır. Bu kapsamda su bahrarı birincil faz, sıvı su ise ikincil faz olarak belirlenmiştir. Bu modelin alt yapısındaki süreklilik denklemleri, momentum korunum denklemleri, enerji korunum denklemleri ve türbülans denklemleri benimsenmiş ve sayısal olarak çözülmüştür. Akış sırasında gerçekleşen, yoğunlaşma ve buharlaşma olayları ise gelişmiş Lee modeli kullanılarak hesaba katılmıştır. Sıvı ve buhar arasındaki ara yüzeyde gözlemlenen yüzey gerilimleri için, sürekli yüzey kuvveti (Continuum Surface Force, CSF) modeli benimsenmiş ve yüzey gerilim değeri $F_{CSF} = 0.073 \text{ N/m}$ olarak, suyun temas açısı ise 20° olarak belirlenmiştir (Wang ve ark. 2015). Sayısal çözüm yöntemi olarak SIMPLE algoritması tercih edilmiştir. Enerji ve momentum denkleminin ayrıklaştırılmasında Second order upwind metodu tercih edilmiştir. Basınç enterpolasyon şemasının çözümü için PRESTO yaklaşımı kullanılmıştır. Zaman adımından bağımsızlaştırma işlemi yapılarak, optimum zaman adımı 2×10^{-4} s olarak belirlenmiştir.

2.5. Ağ (Mesh) yapısı

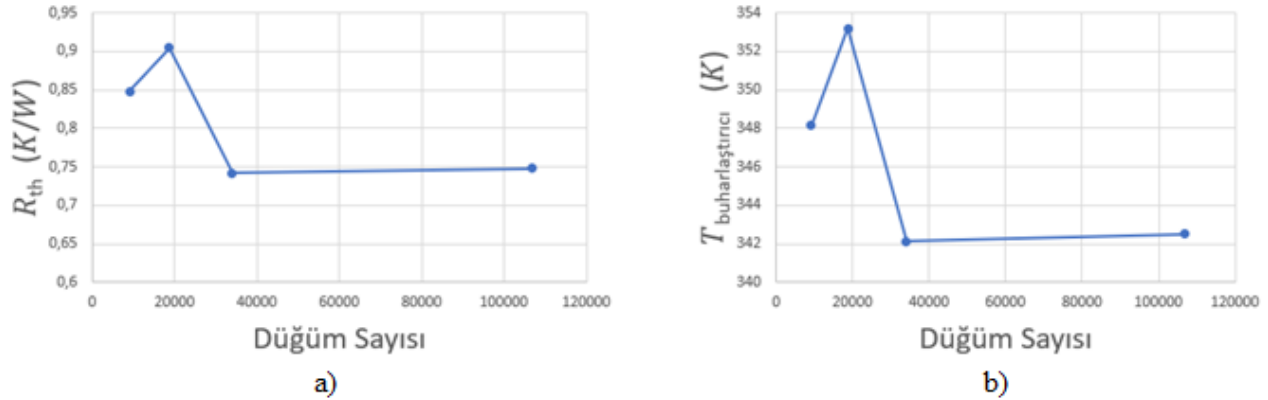
Bu çalışmada incelenen modeller için ağ yapısı oluşturulurken, ısı borusunun yüzeylerine yakın bölgelere daha sık iç bölgelere ise daha seyrek bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Kullanılan ağ yapısı yoğunluğunun, sayısal çözüm sonuçlarını etkilememesi amacıyla, sonuçları

ağ yapısından bağımsızlaştırma işlemi yapılmıştır. Bu kapsamda, mevcut ısı borusu modeli için 9075, 18736, 34054 ve 106934 düğüm noktasına sahip dört farklı mesh yapısı oluşturularak, diğer tüm parametreler sabit kalması koşuluyla sayısal simülasyonlar tekrarlanmıştır. Oluşturulan ağ yapıları Şekil 2’de, elde edilen sonuçların karşılaştırılması ise Şekil 3’de verilmektedir.



Şekil 2. Ağ yapılarının karşılaştırılması

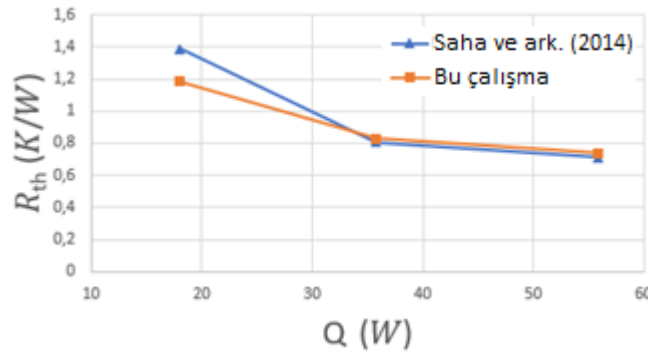
Şekil 3 incelendiğinde, buharlaştırıcı sıcaklığı ve direncinin ağ yapısını oluşturan düğüm sayısı ile değişimi görülmektedir. 34054 ve 106934 düğüm nokta sayısına sahip ağ sistemleri için, elde edilen her iki sonucun da birbirine oldukça yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Fazla düğüm sayısının, sayısal çözümde yapılan işlem sayısını ve çözüm süresini artıracığından dolayı 34054 düğüm sayısı için oluşturulan ağ yapısının, optimum ağ yapısı olarak kullanılabilmesine karar verilmiş ve bu çalışma sırasında yapılan tüm analizlerde ağ yapısı olarak kullanılmıştır.



Şekil 3. Farklı düğüm sayısına sahip ağ yapıları için elde edilen sonuçların karşılaştırılması

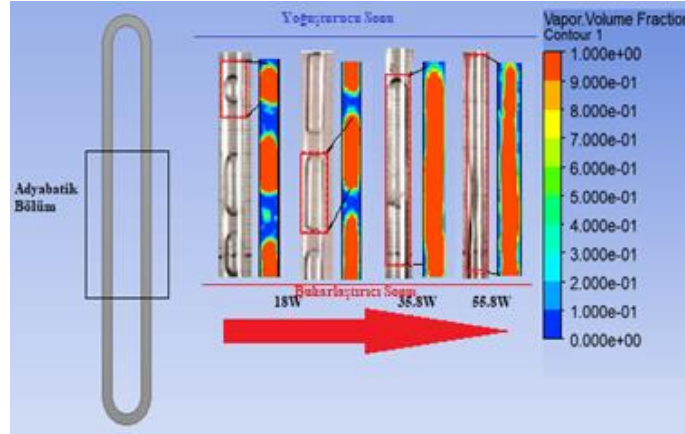
2.6. Sayısal yöntemin güvenilirliğinin test edilmesi

Bu çalışma sırasında kullanılan sayısal metodolojinin ve elde edilen sonuçların güvenilirliğini belirleyebilmek amacıyla, literatürde bulunan benzer bir çalışmanın geometrisi ve sınır şartları birebir kullanılarak sayısal çözüm yapılmıştır. Bu kapsamda literatürde bulunan Saha ve ark. (2014) tarafından yapılan deneysel bir çalışmanın geometrisi kullanılarak, %60 doluluk oranı ve 18 W için simülasyon yapılmıştır. Bu simülasyon sonucu elde edilen sonuçlar ve diğer çalışmanın sonuçları Şekil 4’de birlikte verilmektedir. Şekil incelendiğinde, her iki çalışmadan elde edilen sonuçlar için çizilen eğrilerin birbiri ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Literatür sonuçları ile bu çalışmanın sonuçlarının karşılaştırılması

Isı borularına etkiyen termal güçlerin artması, ısı borularının termo hidrodinamiği üzerinde önemli bir etkiye sahip olan sıvı-buhar akış modellerinde değişikliklere neden olmaktadır. Bundan dolayı, bu çalışma sonucu elde edilen buhar hacim oranları için çizilen kontur grafikleri ile deneysel çalışmadan elde edilen görüntüler Şekil 5’de birlikte verilmiştir. Her iki çalışma sonuçları birlikte incelendiğinde, buhar kabarcıklarının büyüklüğünün ve yerinin birbirleri ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 4 ve Şekil 5 birlikte değerlendirildiğinde, bu çalışmada kullanılan sayısal yöntemin ve elde edilen sonuçların güvenilir bir seviyede olduğu söylenebilir.

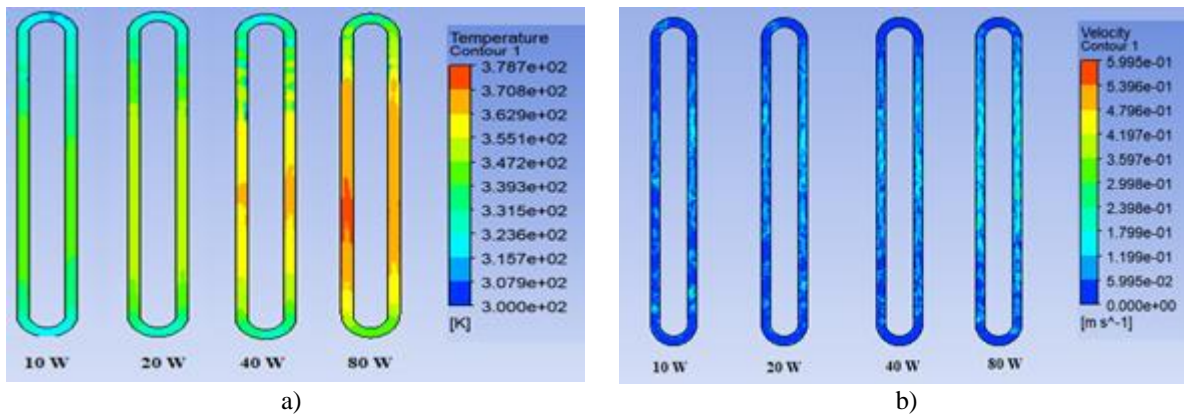


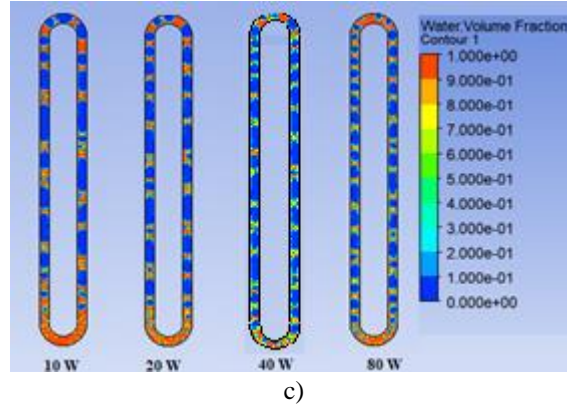
Şekil 5. Literatür (Saha ve ark.,2014) ve bu çalışma için buhar hacim oranının karşılaştırılması

3. Bulgular ve Tartışmalar

Bu çalışma kapsamında incelenen ısı borusunun 4 mm çapa sahip bakır bir borudan yapıldığı varsayılmıştır. Yapılan tüm analizlerde yoğuşurucu sıcaklığı 300 K, buharlaştırıcı uzunluğu 50 mm, çalışma akışkanı ise su olacak şekilde sabit olarak belirlenmiştir. Isı borusunun buharlaştırıcı kısmı aşağıda olacak şekilde dikey konumda durduğu düşünülmüştür. Isı girdileri 10W ile 80W arasında, doluluk oranı ise %40 ile %80 arasında değiştirilmiştir. Yoğuşurucu bölüm ve ortadaki adyabatik bölümün uzunluklarının oranı (L_c/L_{a1}) 0,5, 1, 1,25 ve 2 olacak şekilde model geometriler oluşturularak, ısı borusunun akış ve ısıl karakteristikleri incelenmiştir. İki fazlı akış şartları için, zamana bağlı çözüm yapılarak ilk 20 saniye için çözümler irdelenmiştir. Elde edilen veriler aracılığı ile, çalışılan parametre aralığında incelenen ısı borusunun akış karakteristikleri ve ısıl performansı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla çizilen bazı grafikler aşağıda irdelenmiştir.

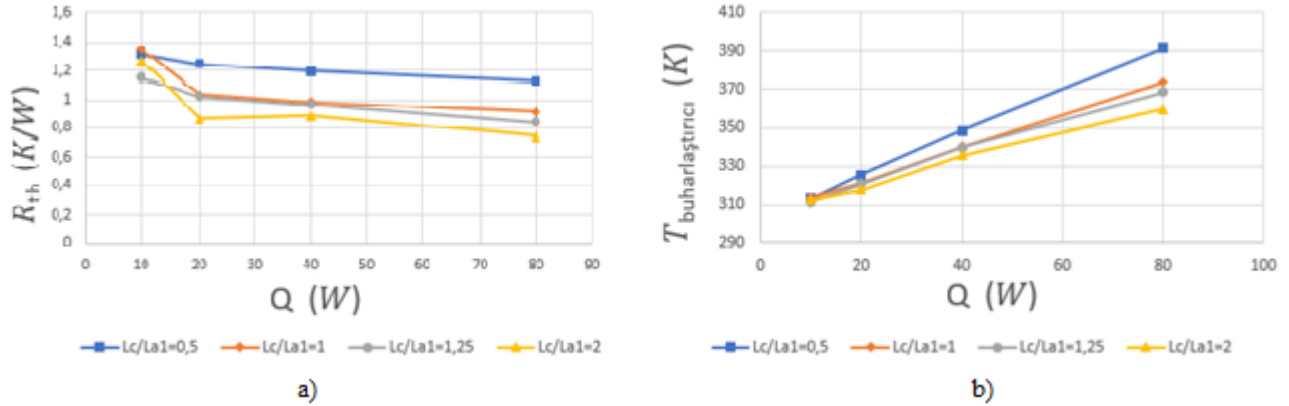
$L_c/L_{a1} = 1$ ve doluluk oranı %50 olduğu durumda, ısı borusunun içindeki sıcaklık dağılımının, hız dağılımının ve su hacim oranının giren ısı miktarı ile değişimi sırasıyla Şekil 6'nın şıklarında verilmektedir. Şekil 6a incelendiğinde, ısı borusunun buharlaştırıcı bölümünden giren ısı miktarı arttıkça, ısı borusu içindeki akışkanın sıcaklık değerlerinin de arttığı görülmektedir. Özellikle 80 W değerinde oldukça yüksek sıcaklıklar gözlemlenmiştir. Benzer olarak Şekil 6b'de de görüldüğü üzere, giren ısı miktarı arttıkça, akışkanın hızı da artmaktadır. Isı borusu içinde bölgesel sıcaklık farkı arttıkça, oluşan yoğunluk farkından dolayı akışkanın hızı da artış göstermektedir. Ayrıca giren ısı miktarının artması ile ısı borusu içinde ki su ve buhar dengesinin değiştiği gözlemlenmiştir.





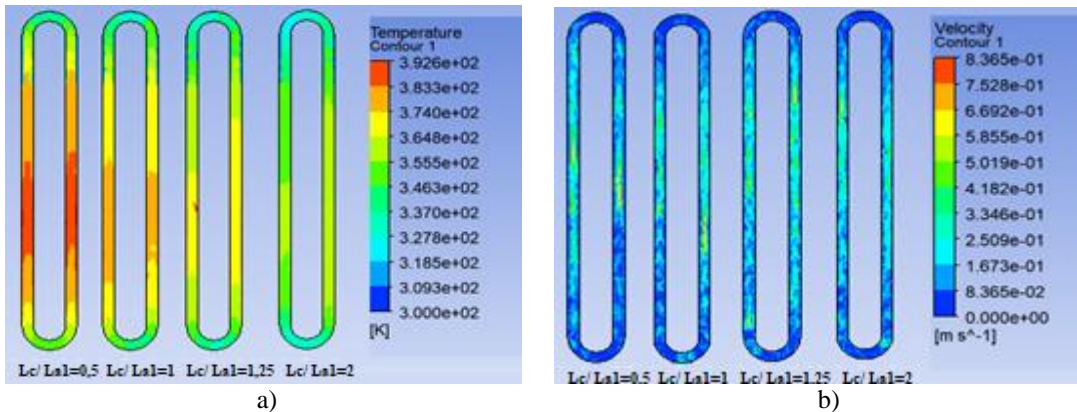
Şekil 6. $L_c/L_{a1} = 1$ ve doluluk oranı %50 olduğu durumda, farklı ısı girdileri için kontur gösterimleri
a) Sıcaklık b) Hız c) Su hacim oranı

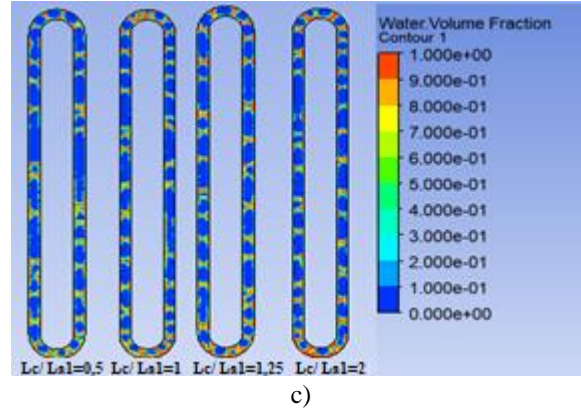
Doluluk oranı % 50 olduğu durumda, farklı L_c/L_{a1} oranları için, ısı direnç ve buharlaştırıcı sıcaklık değerlerinin giren ısı miktarı ile değişimi sırasıyla Şekil 7a ve Şekil 7b'de verilmektedir. Şekillerden de görüldüğü üzere, tüm L_c/L_{a1} oranları için ısı borusuna giren ısı miktarının artması ile ısı direnç değeri azalış göstermektedir. Isıl dirençte görülen bu azalış, giren ısı miktarı arttıkça ısı borusunun ısı performansının attığını belirtmektedir. Ancak, tüm L_c/L_{a1} oranları için ısı borusuna giren ısı miktarının artması ile buharlaştırıcı sıcaklığının da arttığı görülmektedir.



Şekil 7. Doluluk oranı % 50 olduğu durumda, farklı L_c/L_{a1} oranları için (a) ısı direnç ve (b) buharlaştırıcı sıcaklık değerlerinin giren ısı ile değişimi

Giren ısı 40 W ve doluluk oranı %50 olduğu durumda, ısı borusunun içindeki sıcaklık dağılımının, hız dağılımının ve su hacim oranının L_c/L_{a1} oranı ile değişimi sırasıyla Şekil 8'in şıklarında verilmektedir. Şekil incelendiğinde, ısı borusunun L_c/L_{a1} oranı artırıldığında sıcaklık değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu durumun yoğunlaştırıcı uzunluğunun artmasından dolayı ısı borusundan atılan ısı miktarının artması ile gerçekleştiği söylenebilir. Farklı L_c/L_{a1} oranları için çizilen hız dağılımları incelendiğinde ise, L_c/L_{a1} oranı arttıkça akışkan hızının azaldığı görülmektedir. Ayrıca yoğunlaştırıcı uzunluğu arttıkça, ısı borusu içerisindeki su buharı oranının azaldığı belirlenmiştir.

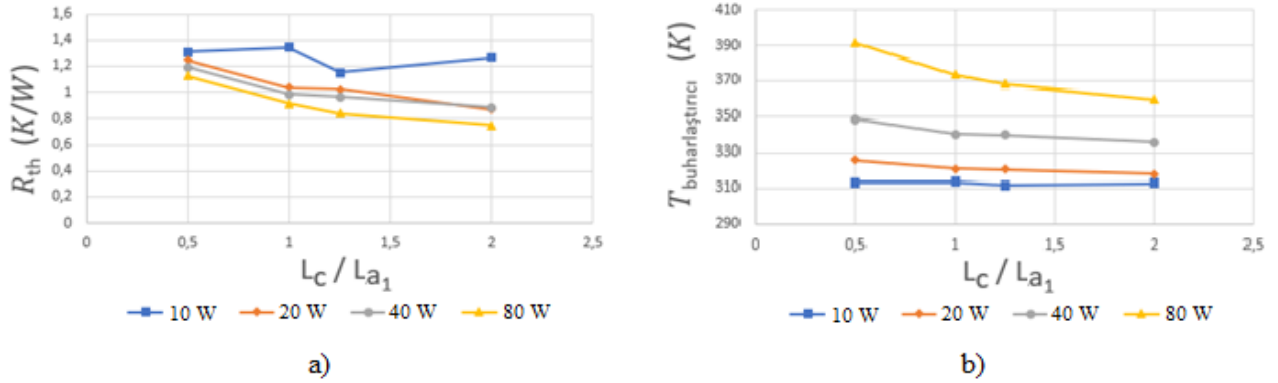




c)

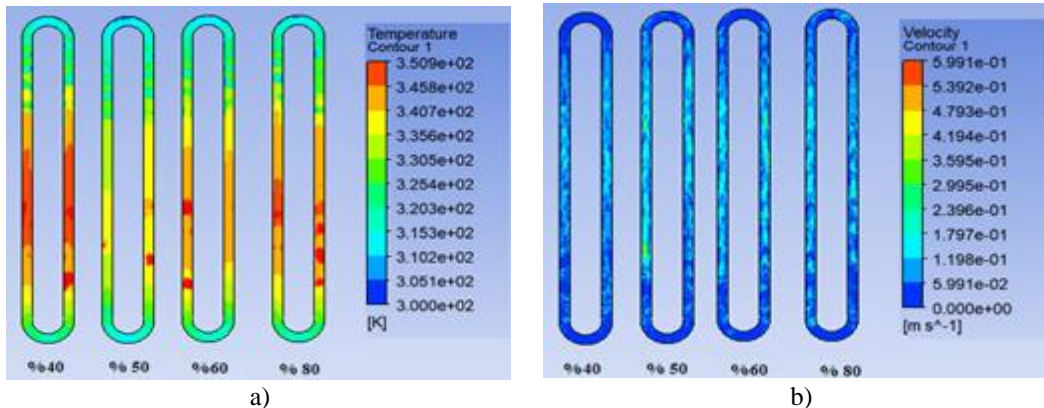
Şekil 8. Giren ısı 40 W ve doluluk oranı %50 olduğu durumda, farklı L_c/L_{a1} oranları için kontur gösterimleri
a) Sıcaklık b) Hız c) Su hacim oranı

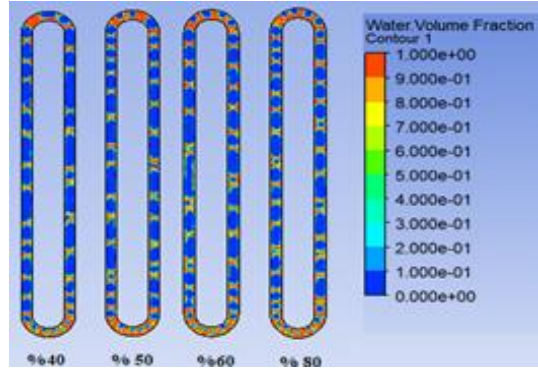
Doluluk oranı % 50 olduğu durumda, farklı giren ısı miktarları için, ısııl direnç ve buharlaştırıcı sıcaklık değerlerinin giren ısı miktarı ile değişimi sırasıyla Şekil 9a ve Şekil 9b'de verilmektedir. Şekiller incelendiğinde yüksek giren ısı miktarları için, L_c/L_{a1} oranının artması ile ısııl direnç değerinin ve buharlaştırıcı sıcaklığının azaldığı görülmektedir. Ancak giren ısı miktarı 10W için, hem ısııl direnç değerinin hem de buharlaştırıcı sıcaklık değerinin, artan L_c/L_{a1} oranından pek etkilenmediği gözlemlenmiştir.



Şekil 9. Doluluk oranı %50 olduğu durumda, farklı giriş ısıları için (a) ısııl direnç ve (b) buharlaştırıcı sıcaklık değerlerinin L_c/L_{a1} oranları ile değişimi

Şekil 10'da ise $L_c/L_{a1}=1$ ve giren ısı miktarı 40 W olduğu durumda, %40 ile %80 doluluk oranı arasında değişen dört farklı doluluk oranını için, ısı borusunun sıcaklık dağılımı, hız dağılımı ve su hacim oranının değişimi görülmektedir. Şekil incelendiğinde, doluluk oranı %40 için buharlaştırıcı sıcaklığının maksimum seviyede olduğu görülmüştür. Ancak %50 doluluk oranları için sıcaklık değerleri aniden düşmektedir. Diğer parametreler sabit iken, ısı borusunun doluluk oranının %50 değerinden artırılması ile sıcaklık ve hız değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca doluluk oranının artması ile ısı borusu içinde ki su ve buhar dengesinin değiştiği gözlemlenmiştir.

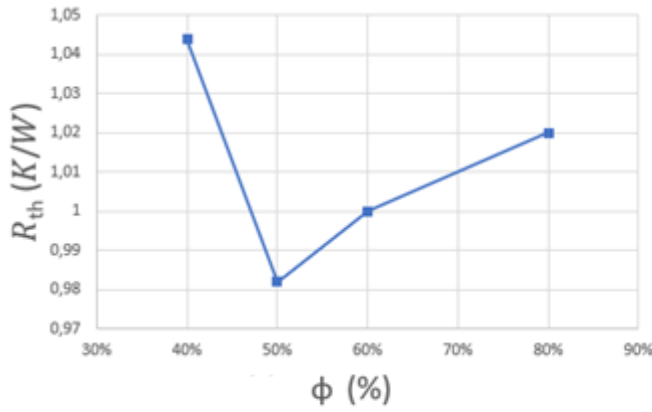




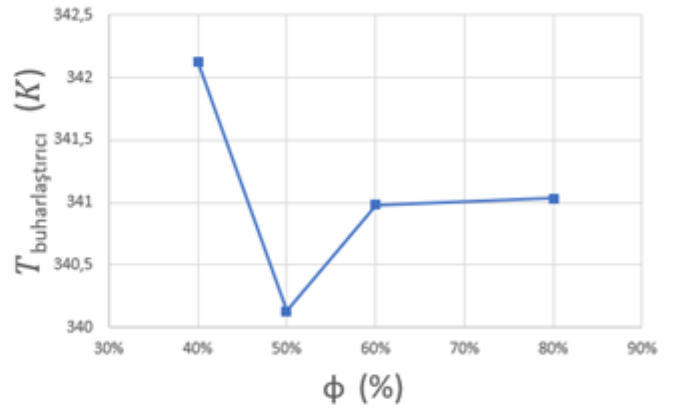
c)

Şekil 10. $L_c/L_{a1}=1$ ve ısı girdisi 40 W olduğu durumda, farklı doluluk oranları için kontur gösterimleri
a) Sıcaklık b) Hız c) Su hacim oranı

Şekil 11'de $L_c/L_{a1}=1$ ve giren ısı 40 W olduğu durumda, ısı direnç ve buharlaştırıcı sıcaklığının doluluk oranları ile değişimi görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü üzere, doluluk oranı %40 olduğu durumda hem ısı direnç hem de buharlaştırıcı sıcaklığı maksimum değerdedir. Ancak doluluk oranının %50'ye çıkması ile bu iki değerde de ani bir düşüş gerçekleşmekte ve minimum seviyeye inmektedir. Doluluk oranı artmaya devam ettikçe, hem ısı direnç hem de buharlaştırıcı sıcaklığı artış göstermektedir. Dolayısıyla, doluluk oranının değişimi ile ısı direncin ve buharlaştırıcı sıcaklığının değişiminin benzer bir davranış gösterdiği söylenebilir. İncelenen doluluk oranlarında, ısı direncinin en düşük olduğu %50 doluluk oranının, ısı borusunun soğutma performansı açısından optimum doluluk oranı olduğu görülmektedir.



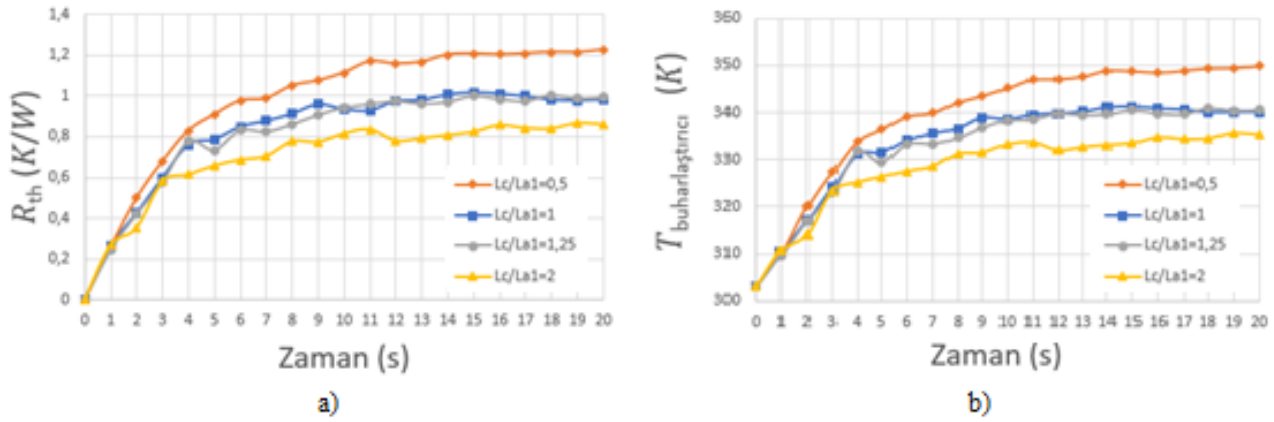
a)



b)

Şekil 11. $L_c/L_{a1}=1$ ve giren ısı 40 W olduğu durumda, (a) ısı direnç ve (b) buharlaştırıcı sıcaklık değerlerinin doluluk oranları ile değişimi

Doluluk oranı % 50 ve giren ısı 40 W olduğu durumda farklı L_c/L_{a1} oranları için, ısı direnç ve buharlaştırıcı sıcaklık değerlerinin zaman ile değişimi sırasıyla Şekil 12a ve Şekil 12b'de verilmektedir. Şekiller incelendiğinde, tüm L_c/L_{a1} oranları için ısı direnç ve buharlaştırıcı sıcaklık değerlerinin zaman ile değişiminin benzer bir profil sergilediği görülmektedir. Genel olarak, L_c/L_{a1} oranı 0,5 için çizilen eğri en üste yer almaktadır. L_c/L_{a1} oranı arttıkça çizilen eğriler ise daha aşağıda yer almaktadır. Tüm L_c/L_{a1} oranları için, hem ısı direnç hem de buharlaştırıcı sıcaklık değerinde yaklaşık olarak 5. saniyeye kadar lineer bir artış gözlemlenmektedir. Bu andan sonra zamanın ilerlemesi ile, artış miktarı azalmakla birlikte yaklaşık 12. saniyeye kadar artış sürmektedir. 12. saniyeden sonra ise önemli bir değişim görülmemektedir. Dolayısıyla bu çalışmada incelenen parametre aralığında, ısı borusunun kararlı hale gelme süresinin yaklaşık olarak 12s olduğu söylenebilir.



Şekil 12. Doluluk oranı % 50 ve giren ısı 40 W olduğu durumda, farklı L_c/L_{a1} oranları için (a) ısı direnci ve (b) buharlaştırıcı sıcaklık değerlerinin zaman ile değişimi

4. Sonuç

Bu çalışma kapsamında, bakır bir borudan yapılan kapalı döngülü bir ısı borusunun ısı performansı sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla, farklı model geometrileri, farklı ısı girdileri ve farklı doluluk oranları için iki fazlı akış şartlarında, üç boyutlu ve zamana bağımlı olarak sayısal analizler yapılmıştır. Elde edilen veriler aracılığı ile, çalışılan parametre aralığında incelenen ısı borusunun akış karakteristikleri ve ısı performansı belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, diğer parametreler sabit iken ısı borusunun buharlaştırıcı bölümünden giren ısı miktarı arttıkça, ısı borusu içindeki akışkanın sıcaklık ve hız değerlerinin arttığı ısı direncinin ise azaldığı belirlenmiştir. L_c/L_{a1} oranının artması ile ise, ısı direnci değerinin ve buharlaştırıcı sıcaklığının azaldığı tespit edilmiştir. Isı borusunun doluluk oranı %40 olduğu durumda, hem ısı direnci hem de buharlaştırıcı sıcaklığının maksimum değerinde olduğu belirlenmiştir. Ancak doluluk oranının %50'ye çıkması ile bu iki değerde de ani bir düşüş gerçekleşerek minimum seviyeye indiği gözlemlenmiştir. Isı borusunun ısı direnci ve buharlaştırıcı sıcaklık değerlerinin zamanla arttığı, ancak yaklaşık olarak 12. saniyeden sonra kararlı hale geldiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, bir ısı borusunun yoğunlaştırıcı uzunluğunun artırılmasının ısı performansı olumlu yönde etkilediği, ısı borusunun doluluk oranı %50 olduğu durumda ise optimum ısı performansı sağlandığı söylenebilir. Yapılan literatür incelemesinde ısı borularının soğutma performansının artırılması üzerine yapılan yeni çalışmalara ihtiyaç olduğu görülmüştür. Bundan dolayı bu çalışmanın çıktılarının, gelecekte yapılacak yeni çalışmalara destek olabileceği, ısı borularının aktif olarak kullanıldığı uzay araçları, haberleşme uyduları, askeri sistemler vb. gibi kritik mühendislik uygulamalarının geliştirilmesine fayda ve bilgi sağlayabileceği umut edilmektedir.

Referanslar

- Al-Rashed, M.H., Dzido G., Korpyś M., Smolka J., Wójcik J. (2016), Investigation on the CPU nanofluid cooling, *Microelectronics Reliability*, 63, 159-165.
- Baitule D. A., Pachghare P. R. (2013), Experimental analysis of closed loop pulsating heat pipe with variable filling ratio. *International Journal Mechanical Engineering and Robotics Research* 2, No 3
- Clement J. and Wang X. (2011), Experimental investigation of pulsating heat pipe performance with regard to fuel cell cooling application, *Applied Thermal Engineering*, 50, 268-274
- Çalışır T., Çalışkan S., Kılıç M., Başkaya Ş. (2017), Çarpan akışkan jetleri kullanarak kanatçıklı yüzeyler üzerindeki akış alanının sayısal olarak incelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32, 127-138
- Fertahi S.D., Bouhal T., Agrouaz Y., Kousksou T., Rhafiki T.E., Zéraouli Y. (2018), Performance optimization of a two-phase closed thermosyphon through cfd numerical simulations, *Applied Thermal Engineering*, 128, 551–563
- Gupta N.K., Barua A., Mishra S., Singh S.K., Tiwari A.K., Ghosh S. K. (2019), Numerical study of CeO₂/H₂O nanofluid application on thermal performance of heat pipe, *Materials Today: Proceedings*, 18, 1006–1016
- Ho C.J., Cheng C.Y., Yang T.F., Rashidi S., Yan W.M. (2021), Experimental study on cooling performance of nanofluid flow in a horizontal circular tube, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 169, 120961.
- Kilic M. (2018), A numerical analysis of transpiration cooling as an air cooling mechanism, *Heat Mass Transfer*, 54, 3647–3662

- Kilic M., Muhammad A.H. (2019), Numerical investigation of combined effect of nanofluids and multiple impinging jets on heat transfer, *Thermal Science*, 23 (5B), 3165-3173.
- Kumaer P. (2019), Numerical investigation of fluid flow and heat transfer in trapezoidal microchannel with groove structure, *International Journal of Thermal Science*, 136, 33–43
- Lin Z.R., Wang S.F., Chen J.J. (2011), Experimental study on effective range of miniature oscillating heat pipes, *Applied Thermal Engineering*, 31(5), 880–886
- Mahdavi M., Sharifpur M., Meyer J.P. (2020), Fluid flow and heat transfer analysis of nanofluid jet cooling on a hot surface with various roughness, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 118, 104842.
- Masip Y., Campo A., Nunez S.M. (2020), Experimental analysis of the thermal performance on electronic cooling by a combination of cross-flow and an impinging air jet, *Applied Thermal Engineering*, 167, 114779
- Naik R., Varadarajan V., Pundarika G., Narasimha K. R. (2013), Experiment investigation and performance evaluation of a Closed loop PHP, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 6(2), 267-275
- Noori S.M.A., Abadi R, Meyer J.P., Dirker J. (2018), Numerical simulation of condensation inside an inclined smooth tube, *Chemical Engineering Science*, 182, 132–145
- Pachghare P. R., Mahalle A. M. (2014), Thermo-hydrodynamics of closed loop pulsating heat pipe: an experimental study. In No 3387-3394 India
- Pouryoussef S.M., Zhang Y. (2017), Analysis of chaotic flow in a 2D multi-turn closed-loop pulsating heat pipe, *Applied Thermal Engineering*, 126, 1069–1076
- Rahman M. L., Sultan R. A., Islam T., Noor M. H., Mohammad A. (2015), An experimental investigation on the effect of fin in the performance of closed loop pulsating heat pipe. In No.1216 Bangladesh
- Saha N., Das P.K., Sharma P. (2014), Influence of process variables on the hydrodynamics and performance of a single loop pulsating heat pipe, *International Journal Heat Mass Transfer*, 74, 238–250
- Wang J., Bai X. (2018), The features of clphp with partial horizontal structure, *Applied Thermal Engineering*, 133, 682–689
- Wang J., Ma H., Zhu Q. (2015), Effects of the evaporator and condenser length on the performance of pulsating heat pipes, *Applied Thermal Engineering*, 91, 1018-1025
- Wang J., Xie J., Liu X. (2020), Investigation of wettability on performance of pulsating heat pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 150, 119354
- Wu R., Hong T., Cheng Q., Zou H., Fan Y., Luo X. (2019), Thermal modeling and comparative analysis of jet impingement liquid cooling for high power electronics, *International Journal of Thermal Science* (137) 42–51
- Xie F., Li X., Qian P., Huang Z., Liu M. (2020), Effects of geometry and multisource heat input on flow and heat transfer in single closed-loop pulsating heat pipe, *Applied Thermal Engineering* (168) 114856



Cam Atık Çamuru ile Güçlendirilmiş Kilin Mukavemet, Oturma ve Şişme Davranışlarının İncelenmesi: Çevre Dostu Bir Zemin İyileştirme Yaklaşımı

Investigation of Strength, Settlement and Swelling Behavior of Glass Waste Sludge Treated Clay: An Eco-Friendly Soil Improvement Approach

Barış Mahmutluoğlu¹ , Baki Bağrıaçık*² 

¹Mersin Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, 33110, Mersin, TÜRKİYE
²Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Balcalı, 01330, Adana, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 19/07/2020

Kabul / Accepted: 19/03/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 27/05/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Bu çalışmada, cam endüstrisinin bir ön-atığı olan cam atık çamurunun (CAÇ), killi bir zeminin (CI) mukavemet ve konsolidasyon parametrelerine etkileri incelenmiştir. Son yıllarda, sürdürülebilirlik ve çevre koruma konularında gittikçe gelişen hassasiyet, bu tür atıkların zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılmalarını gündeme getirmiştir. CAÇ, cam üretebilmek için gerekli olan mineralojik kısım, ilgili madenden ayrıştırıldıktan sonra ortaya çıkmakta ve sürekli doğada birikmektedir. Bu atığın kullanımı ile gerçekleştirilmiş zemin iyileştirme çalışmaları, ilgili literatürde henüz bulunmamaktadır. Çalışmada, kil-cam atığı karışımlarının en ideal su muhtevası, karışım oranları, mukavemet, oturma ve şişme değişimleri gibi parametreleri irdelenmiştir. Mikro-yapı analizleri gerçekleştirilerek, söz konusu zeminin iç yapısı ve iç-yapı değişimleri gözlemlenmiş ve sonuçta killerin cam atığı ile güçlendirilebileceği, çevre-dostu bir yaklaşımla vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler

“Zemin İyileştirme, Cam Atık Çamuru, Serbest Basınç Mukavemeti, Konsolidasyon, Sürdürülebilirlik, Atık Yönetimi”

Abstract

In this study, the effects of glass waste sludge, which is a pre-waste product of glass industry, on the strength and consolidation parameters of a clayey soil were investigated. In recent years, the sensitivity that have increasingly grown in aspects of sustainability and environmental protection brought the utilization of these waste products in soil improvement applications to agenda. Glass waste sludge arises in the sequel of extricating the necessary mineralogical part to produce glass from the mined material and is being accumulated in nature consistently. Soil improvement studies regarding the utilization of this waste are not currently present in the relevant literature. In the study, parameters such as the most ideal water content, mixture ratios, strength, settlement, and swelling alterations of clay-glass waste mixtures were examined. By means of conducting micro-structural analyses, internal structure, and internal structural changes of the soil in question were observed and it was emphasized eventually that clays can be improved with glass waste in an environmentally friendly approach.

Key Words

“Soil Improvement, Glass Waste Sludge, Unconfined Compressive Strength, Consolidation, Sustainability, Waste Management”

1. Giriş

Atıkların zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılması, uzun yıllardır araştırmacıların temel inceleme alanlarından biri olmuştur. Bu atıklar ya tek olarak ya da başka atık malzemelerle beraber kullanılarak birçok deneysel ve teorik çalışma gerçekleştirilmiştir. Atık malzemelerin çevreye atılması ile doğa için bir tehlike oluşması, atıkların depolanması, bertaraf edilmesi, atıklar için ödenmesi zorunlu olan ağır vergiler ile malzemelerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanılması gerekli olan pahalı kimyasal maddelerin kısmen ya da tamamen uygun atık malzemelerle değiştirilmesi gibi unsurların bir arada değerlendirilerek optimize edilmesi, çok yönlü fayda sağlayabilecek bir yaklaşım olarak ortaya çıkmaktadır.

İlgili literatür incelenecek olursa, atık malzemeler kullanılarak zeminlerin mühendislik parametrelerini geliştirme alanında yapılmış olan çalışmalara rastlanılabilir. Örneğin, Abbaspour vd. (2019) tarafından gerçekleştirilmiş olan deneysel bir çalışmada, killi ve kumlu zeminler, atık lastik tekstil liflerinin bu zeminlere %0.5, %1, %2, %3 ve %4 oranlarında karıştırılması ile güçlendirilmeye çalışılmıştır. Çalışma sonunda, %1 oranında atık lastik tekstil lifi eklenmesinin killi zeminlerin basınç mukavemetlerinde önemli oranda düşüşler, kumlu zeminlerde ise yine aynı oranda atık malzeme için basınç mukavemetlerinde artışlar gözlemlenmiştir. Güllü (2014) tarafından yürütülmüş olan başka bir çalışmada, ince daneli zeminlere %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında taban külü adı verilen bir atık malzeme katılmış ve bu atığın söz konusu zeminlerin serbest basınç mukavemeti, şekil değiştirme oranı, elastiklik özellikleri ve enerji emme kapasitelerindeki zaman içinde oluşan etkiler incelenmiştir. Sonuç olarak, %25 atık oranına kadar, bahsi geçen parametrelerde kayda değer bir değişime rastlanılmamış olup, en ideal etkinin %30 atık eklenmesi durumunda elde edildiği vurgulanmıştır. Liu vd. (2019) tarafından, çimento, pirinç kabuğu külü ve kalsiyum karbür artığı malzemeleri zemin iyileştirme amacıyla deneysel olarak incelenmiştir. Sonuç olarak, pirinç kabuğu külü ve kalsiyum karbür artığı, söz konusu zemin örneklerinin kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerini yüksek oranda arttırmıştır. Killi bir zeminin basınç mukavemetinin, 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri sonrasında, %3 ve %6 çimento ile %0, %2.5, %5, %7.5 ve %10 oranlarında lastik lifleri eklenmesi suretiyle ne oranlarda değiştiği Yadav vd. (2019) tarafından gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda, %7.5 değerinde lastik lifleri eklenmesinin en ideal oran olduğu tespit edilmiştir. Long vd. (2019) tarafından, farklı oranlarda kömür gang malzemesi çimento-zemin karışımlarına eklenmiş; 28 günlük bir zaman periyodu sonrasında karışımların basınç mukavemetlerinde %81.8 oranında iyileşme meydana geldiği tespit edilmiştir. Alüminyumlu kimyasal bir bileşimin hidratlaştırılmış çift sülfat tuzlarını içeren bir tür atık su arıtma çamurunun, %8 oranında şap çamuru ile güçlendirilerek zemin stabilizasyonunda değerlendirilebileceği, Shah vd. (2020) tarafından belirlenmiştir. Taki vd. (2020) tarafından, kireçle stabilize edilmiş atık çamuru kullanılarak zeminlerin mühendislik parametrelerinin iyileştirilme potansiyellerinin mevcudiyeti sorgulanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, söz konusu atık çamuruna %0, %2, %4, %6 ve %8 oranlarında CaO eklenmiş ve deney numuneleri 7, 14 ve 28 günlük kür sürelerine tabi tutulmuştur. Deneysel çalışma neticesinde, numunelerin kesme mukavemetlerinde artışlar ve şişme potansiyelleri ile plastiklik özelliklerinde azalmalar tespit edilmiştir. Atık su çamuru külünün, zeminlerin kesme mukavemeti parametrelerine etkileri Ayininuola&Ayodeji (2016) tarafından deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada, %7 oranında eklenen malzemenin, çimentolaşma etkisi yaratmak suretiyle parçacıkları birbirlerine bağladığı ve bu süreç sonunda kesme mukavemetlerini arttırdığı belirlenmiştir. Zhan vd. (2014) ile Ayodele vd. (2016) tarafından yürütülen çalışmalarda, atık su arıtma çamuru kullanılarak zeminlerin mukavemet değerleri başarılı bir şekilde arttırılmıştır. İlave olarak, de Figueiredo Lopes Lucena vd. (2014) tarafından yürütülen bir çalışmada, zemin numunelerinin CBR, serbest basınç mukavemeti, dolaylı çekme dayanımı ve elastiklik modülü değerleri, kireç ile stabilize edilmiş atık su arıtma çamuru kullanılarak iyileştirilmiştir. Konu ile ilgili literatür incelenecek olursa, benzer atıklarla gerçekleştirilmiş olan çalışmalara rastlanılabilir. Örneğin, çimento (Tremblay vd., 2002; Gu&Chen, 2020), çimento fırın tozu (Badrawi&El-kady, 2019), kireç (Bell, 1996; MohdYunus vd., 2016; Correa-Silvia vd., 2018), uçucu kül (Cokca vd., 2009; Biradar vd., 2014; Arulrajah vd., 2018), fırın dışıkları (Kumar&Sivapullaiah, 2012), pirinç kabuğu (Kumar&Gupta, 2016), geri dönüştürülmüş beton agregaları (Kianimehr vd., 2019; Yokohama&Sato, 2019), sığır kazeini (Chang vd., 2018), biyoyakıt silisi (Jin vd., 2018), jeopolimer tozu (Bilondi vd., 2018), cam lifi (Ateş, 2016), mermer tozu ve atığı (Gupta&Sharma, 2014; Ural vd., 2014; James&Pandian, 2016), kenaf lifi (Esmailpour vd., 2019), kiremit tozu (Keerthi vd., 2013), palmye yağı yakıt külü (Pourakbar vd., 2015), atık lastik parçacıkları (Abbaspour vd., 2019; Akbarimehr vd., 2019; Naseem vd., 2019), atık taş tozu (Pastor vd., 2019; Zainuddin vd., 2019), inşaat yıkıntı atığı ve çimento (Bağrıaçık&Mahmutluoğlu, 2020), cam üretim atığı (Mahmutluoğlu&Bağrıaçık, 2021) ve benzeri birçok atık malzeme, zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla değerlendirilmiştir.

Literatürde, bahis konusu atıkların tek başlarına olduğu kadar, beraber kullanılmalarıyla ilgili de çalışmalar yer almaktadır. Örnek olarak, Fauzi vd. (2016) tarafından, plastik yüksek yoğunluklu polietilen atıklar ile kırılmış cam parçaları killi zeminlere eklenmiş ve kil numunelerinin CBR değerlerinin, her iki atık türünün karışımlardaki oranlarının arttırılması ile orantılı olarak arttığı saptanmıştır. Lin vd. (2007) tarafından yürütülmüş olan başka bir çalışmada, atık su arıtma çamuru külü ve uçucu kül kullanılarak, yumuşak killi zeminlerin yer aldığı bir yol temel altı incelemesi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, atık su arıtma çamuru külünün, uçucu külün yerine kullanılabilir kapasitede olduğu belirlenmiştir. Hasan vd. (2016) tarafından, şeker kamışı küspesi külü ve sönmüş kireç, bir karayolu temel altı zemininin stabilizasyon çalışmasında birlikte kullanılarak, söz konusu zeminlerin mühendislik parametrelerinde iyileşmeler meydana geldiği gözlemlenmiştir. Uçucu kül ve mısır külü Brooks (2019) tarafından, çimento ile pirinç kabuğu ise Basha vd. (2005) ile Ramakrishna&Pradeepkumar (2006) tarafından zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılmış ve zeminlerin serbest basınç mukavemeti, CBR, plastiklik özellikleri ile bu yöntemlerin uygulama masraflarının olumlu yönde değiştiği saptanmıştır. Sharma vd. (2008) ile Ramakrishna&Pradeepkumar (2006), yürütmüş oldukları çalışmalarda, kireç, kalsiyum klorür ve pirinç kabuğu külü ile killi zeminleri stabilize etmeye çalışmış ve bu katkı malzemelerinin kilin iyileştirme çalışmalarında değerlendirilebileceğini vurgulamışlardır.

Yukarda bahsedilmiş olan çalışmalar, endüstriyel atık malzemelerinin doğaya birikimi sonucunda oluşacak zararlı etkileri indirmek, söz konusu atıkların bertaraf edilmesi, depolanması, atıklar için ödenen ağır depolama ve/veya geri dönüştürme vergi ve ücretlerinin azaltılması gibi önemli unsurları amaçlamaktadır. Gerçekleştirilmiş olan bu çalışmada, daha önce bu amaçlarla değerlendirilmemiş olan bir atık malzeme kullanılmıştır. Söz konusu atık, cam endüstrisinin bir ön ürünüdür. Cam üretmek için gerekli olan madenden, cam üretilecek mineralojik kısım ayrıştırıldıktan sonra geriye cam atık çamuru adı verilen bir atık malzeme kalmaktadır. Bu atık, her yıl milyonlarca ton olarak doğaya atılmakta ve ciddi bir çevre kirliliğine yol açmaktadır. Bu atık malzeme, zemin iyileştirme çalışmalarında değerlendirilerek hem yukarda sıralanan tüm hedeflere hizmet etmekte hem de pahalı güçlendirme malzemelerinin kısmen ya da tamamen yerine geçebilecek potansiyele sahip olması sebebiyle ilgili literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

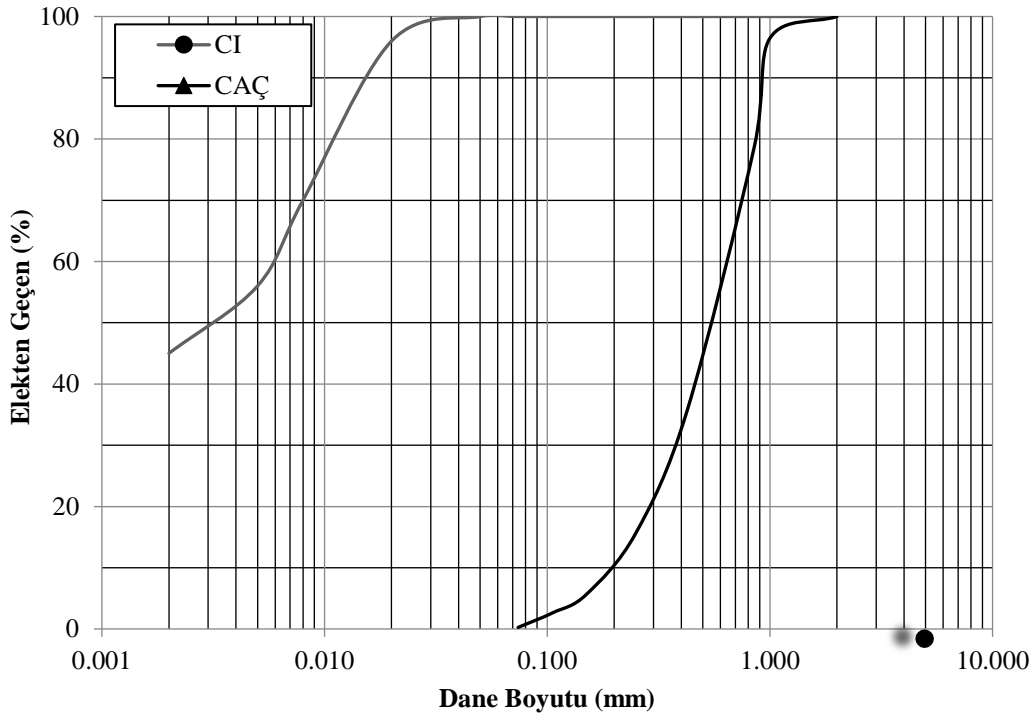
2. Materyal ve Yöntem

2.1. Materyal

Çalışmada kullanılan kil zemin (CI) numuneleri Adana İl' inden temin edilmiştir. Cam atık çamuru (CAÇ) ise, Mersin-Adana Otoyolu üzerinde yer alan bir cam fabrikasından alınmıştır. CI ve CAÇ' nin alınmış olduğu bölgeler Şekil 1' de gösterilmiştir. Her iki malzeme üzerinde gerçekleştirilmiş olan elek analizi deney sonuçlarına ait dane dağılımı eğrileri, aşağıda Şekil 2' de sunulmuştur. Malzemelerin endeks özelliklerini belirleyebilmek adına, Çukurova Üniversitesi zemin mekaniği laboratuvarında bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. CI numunesinin dane birim hacim ağırlık, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası sırasıyla 27 kN/m^3 , 17.40 kN/m^3 ve %18.10 olarak, likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri ise, yaklaşık olarak sırasıyla %42, %24 and %18 olarak tespit edilmiştir (TS 1900-1). Kullanılan zemin, TS 1500' e göre, "orta plastisiteli kil" olarak sınıflandırılmıştır. Kil zemin için yapılan analizlerde, zeminin kuvars, kalsit ve kil grubu mineraller (kaolinit, simektit ve vermikülit) içerdiği görülmüştür. CAÇ' nin dane birim hacim ağırlığı ise 27.6 kN/m^3 olarak bulunmuştur (Mahmutluoğlu&Bağrıaçık, 2021).



Şekil 1. Numunelerin Alınmış Olduğu Lokasyonlar (1-CI, 2- CAÇ)



Şekil 2. CI ve CAÇ için Dane Çapı Dağılım Eğrileri

CI ve CAÇ için kimyasal içerikler, XRF (Minipal 4) analizleri gerçekleştirilmek suretiyle belirlenmiştir. Elde edilen kimyasal analiz sonuçları, aşağıda Tablo 1 olarak verilmiştir.

Tablo 1. Kil (CI) ve cam atık çamurunun (CAÇ) kimyasal içerikleri

İçerik (%)	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₂	LL
CI	6.1	18.4	50.6	0.65	3.10	3.20	3.10	8.70	2.50	1.65	-	3.15
CAÇ	6.49	8.24	18.65	8.73	8.31	22.89	9.65	7.56	5.98	3.50	-	-

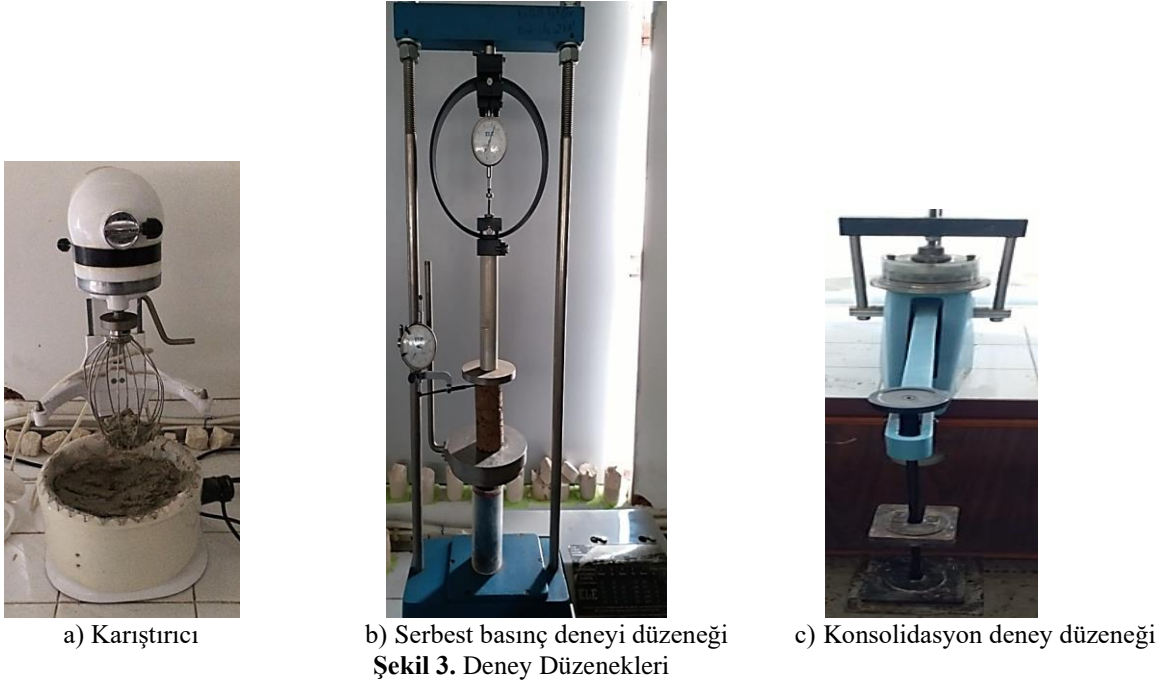
2.2. Yöntem

2.2.1. Mukavemet deneyleri

Kullanılan cam atığının, kil zeminin mukavemet parametrelerinde gerçekleştirdiği değişimleri belirleyebilmek amacıyla serbest basınç deneyleri yapılmıştır (Şekil 3a). Bir karıştırıcı (Şekil 3b) yardımıyla, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında karışımlar yapılarak oluşturulan numunelerde kompaksiyon deneyleri gerçekleştirilmiş ve optimum su miktarları belirlenmiştir. Her karışım oranı için optimum su muhtevasında hazırlanan zemin numunesi, 50 mm çapında, boyu çapının iki katı, doymuş ve kılcal çatlak içermeyecek şekilde oluşturulmuştur (TS1900-2). Zemin numunesi, iki parçalı kalıp yağlanarak çelik tüpe yerleştirilmiştir. Kalıbın iki ağzından taşan zemin numunesi, kıl testere ile kesilip atılmıştır. Oluşturulan deney numuneleri serbest basınç deneyine tabi tutularak dayanımlar belirlenmiştir. Deneylerde, zemin numunesi, presin alt platformuna merkezlenerek oturtulduktan sonra üst başlık numune üst yüzeyine rahatça ve tam degecek şekilde indirilmiş ve bu işlemler ilgili standartta belirtildiği şekilde gerçekleştirilmiştir (TS1900-2). Boy değişimini ölçen komparatör saati, alt ve üst başlıklar arasına yerleştirilerek sıfırlanmıştır. Yüklemeler, numunede dakikada %0.5-%2 arası birim boy kısalması oluşturacak şekilde, standartta belirtildiği gibi yapılmıştır (TS1900-2). Sonuçta, taşıma güçleri belirlenirken, düşey yük-deplasman eğrilerinin pik yaptığı değerler alınmış ve bu pik değerlerin yarısı alınarak kohezyon değerleri belirlenmiştir.

2.2.2. Konsolidasyon deneyleri

DeneySEL çalışmada, kimyasal sıvıların her bir konsantrasyonu için üçer adet deney numunesi üzerinde konsolidasyon deneyleri yapılmıştır (Şekil 3c). Konsolidasyon deneyleri, TS 1900-2' de belirtildiği şekilde yürütülmüştür. Konsolidasyon deneyi yapılacak olan numuneler, 100 kPa ön-konsolidasyon basıncı altında ön-konsolide edilen zeminden alınmış ve deneylerde iç çapı 50 mm, yüksekliği 20 mm olan ringler kullanılmıştır. Konsolidasyon hücresi içerisine doldurulan sıvı, ön-konsolide edilen zemindeki karışım sıvısı ile aynı olacak şekilde hazırlanmıştır. Hücre içerisindeki sıvının buharlaşmasını önlemek için hücrenin üst yüzeyi lastik bir kılıf ile kapatılmıştır. Hücre sıvısı içerisinde 1 gün süreyle bekletilerek doymuş hale getirilen numuneler, 400 kPa gerilme kademesine kadar yüklenmiştir. Deneyler tamamlandıktan sonra, yük-boşluk oranı grafikleri çizilerek ilgili yorumlar yapılmıştır. Ayrıca, tüm numuneler için şişme basınçları da hesaplanmıştır.



Şekil 3. Deney Düzenekleri

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Optimum Su İçeriklerinin Belirlenmesi

%5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında hazırlanmış olan karışımlar için optimum su miktarlarını belirlemek için kompaksiyon deneyleri yapılmış ve sonuçları Tablo 2' de verilmiştir.

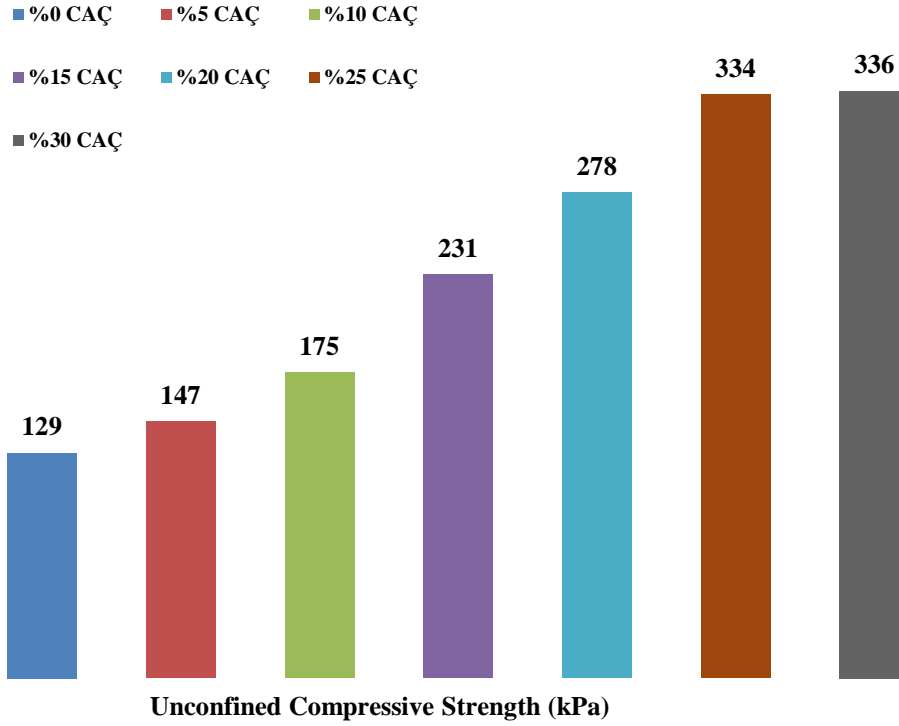
Tablo 2. Farklı Karışım Oranları için Kompaksiyon Sonuçları

Karışım Oranı (%)	Optimum Su İçeriği	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)
0	18.10	17.40
5	19.56	17.46
10	19.89	17.75
15	21.10	18.25
20	21.35	18.39
25	21.55	18.93
30	21.69	18.46

Sonuçlara göre, CI içindeki CAÇ oranı arttıkça, karışımın birim hacim ağırlığının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, CAÇ oranının artmasıyla daha iyi sıkışmanın oluşması için eklenmesi gereken su miktarının da arttığı belirlenmiştir. Yine, %25 CAÇ eklenmesi durumunda, Tablo 2' den de gözlemlenebileceği gibi, en yüksek maksimum kuru birim hacim ağırlık değerine ulaşılmış ve %25 den daha yüksek oranlarda CAÇ eklenmesinin maksimum kuru birim hacim ağırlığı düşürdüğü belirlenmiştir.

3.2. Karışımların Mukavemet Parametrelerinin Belirlenmesi

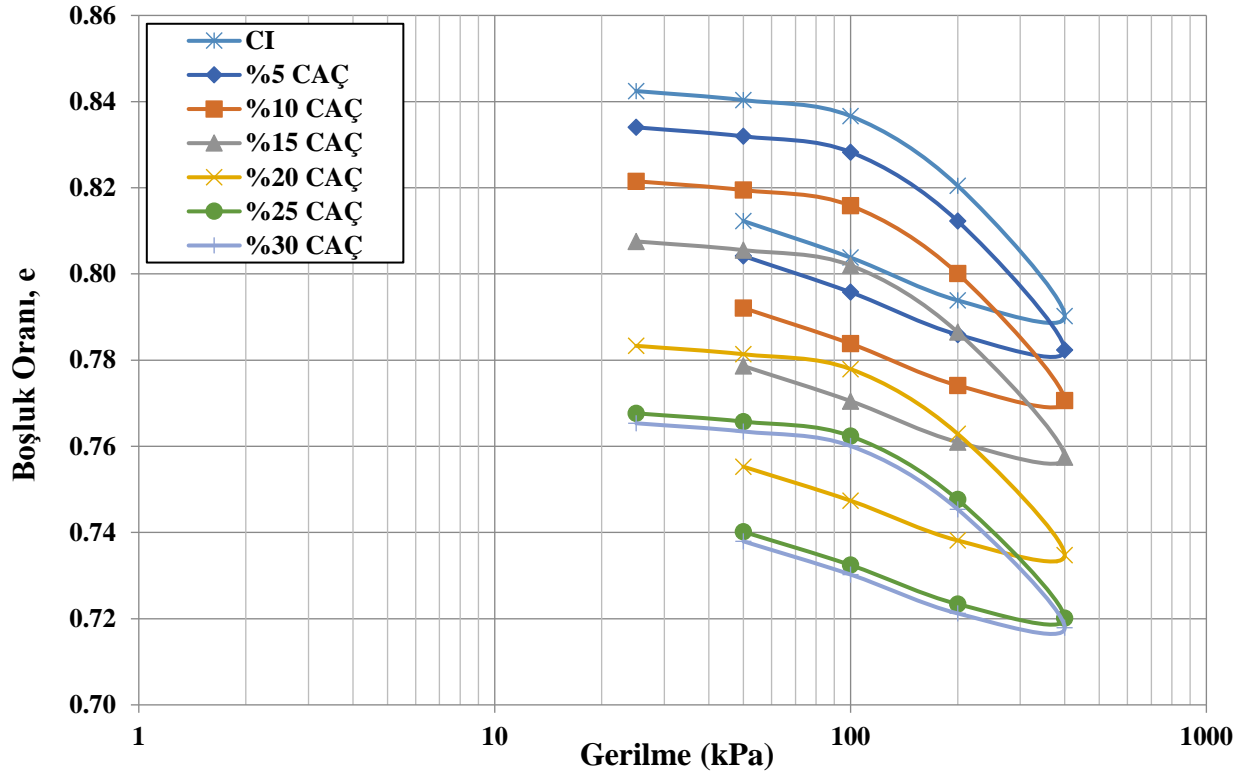
%5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında hazırlanan karışımlar için hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 4' te verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında, artan CAÇ oranına bağlı olarak serbest basınç mukavemeti değerlerinin de kayda değer oranlarda arttığı gözlemlenmiştir. %25 CAÇ oranından sonra serbest basınç mukavemetlerinde kayda değer artışlar gözlemlenmediği için, %25 oranından fazla katkının eklenmesinin serbest basınç mukavemetinde bir iyileşmeye neden olmayacağı belirlenmiştir.



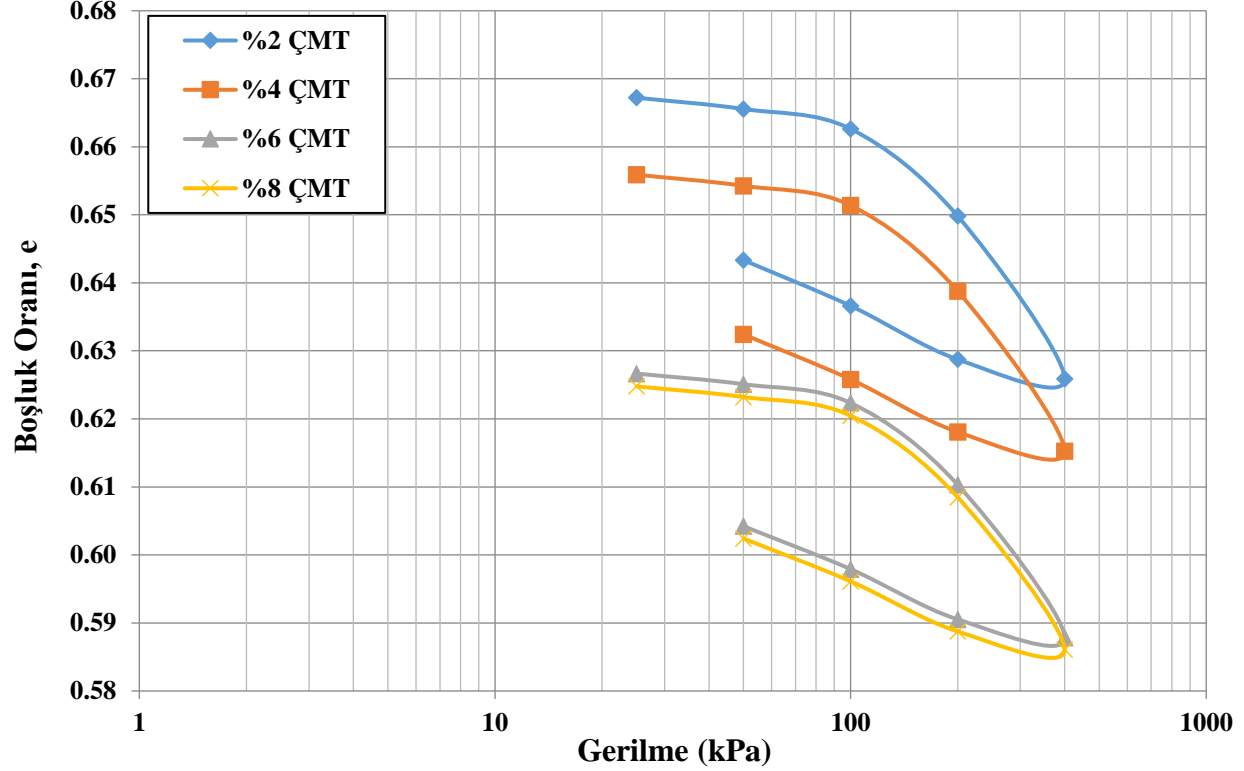
Şekil 4. Farklı CAÇ Oranları için Serbest Basınç Mukavemetleri

3.3. Karışımların Oturma Parametrelerinin Belirlenmesi

Cam atık çamurunun, kilin konsolidasyon ve şişme davranışına olan etkilerinin araştırılması amacıyla laboratuvarında bir seri konsolidasyon deneyi gerçekleştirilmiştir. İlave olarak, cam atık çamuru, çok yaygın olarak zemin güçlendirme çalışmalarında tercih edilen, geleneksel bir iyileştirme malzemesi olan çimento (ÇMT) ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmayı sağlayabilmek adına, hem aynı şartlarda zemine sadece farklı oranlarda çimento eklenerek hem de cam atığı ile çimento yine değişen oranlarda beraber kullanılarak bir dizi deney yapılmış ve elde edilen sonuçlar, Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7' de sunulmuştur. Şekil 5' e bakıldığında, 25kPa gerilme kademesinde en büyük boşluk oranı 0.842 olarak saf kilde çıkmıştır. Saf kil için, zamana bağlı artan gerilme kademelerine bağlı olarak, boşluk oranı 0.790 değerine kadar düşmektedir. Ki zemine %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında CAÇ eklenmesi halinde, 25kPa gerilme kademesinden 400 kPa gerilme kademesine kadar, boşluk oranları sırasıyla 0.834' ten 0.782' ye, 0.822' den 0.771' e, 0.808' den 0.758' e, 0.783' den 0.735' e, 0.768' den 0.720' ye ve 0.765' den 0.718' e düşmüştür. Yani, CI içerisine, %5' den %30' a varan oranlarda CAÇ eklenmesi durumunda, 25kPa' dan 400 kPa' a kadar olan gerilme kademelerinde, boşluk oranları 1.17 kata varan oranlarda azalmıştır. %25 CAÇ oranına kadar boşluk oranlarındaki azalmalar yüksek oranlarda olurken, %25' den sonraki değerlerde ciddi bir azalma kaydedilmemiştir. Bu nedenle, bu tür killerde, zeminin zamana bağlı oturmalarındaki azalmalar için %25 CAÇ oranının yeterli olduğu belirlenmiştir. Şekil 6' da, %2, %4, %6 ve %8 oranlarında ÇMT katkısı kullanılması durumlarında, farklı gerilme kademeleri için boşluk oranı değişimleri görülmektedir. 25kPa gerilme kademesinden 400 kPa gerilme kademesine kadar, boşluk oranları sırasıyla 0.667' den 0.626' ya, 0.656' dan 0.615' e, 0.627' den 0.588' e ve 0.625' den 0.586' ya düşmüştür. Böylece, ÇMT katkısı ile, CI' nin zamana bağlı boşluk oranlarında, yaklaşık olarak 1.44 kata varan azalmalar meydana gelmiş olduğu söylenebilir. Buradan, karışımlarda kullanılacak en iyi ÇMT oranı %6 olarak belirlenmiştir. Bu orandan sonra, her gerilme kademesinde, boşluk oranlarında kayda değer azalmalar gözlemlenmemiştir.

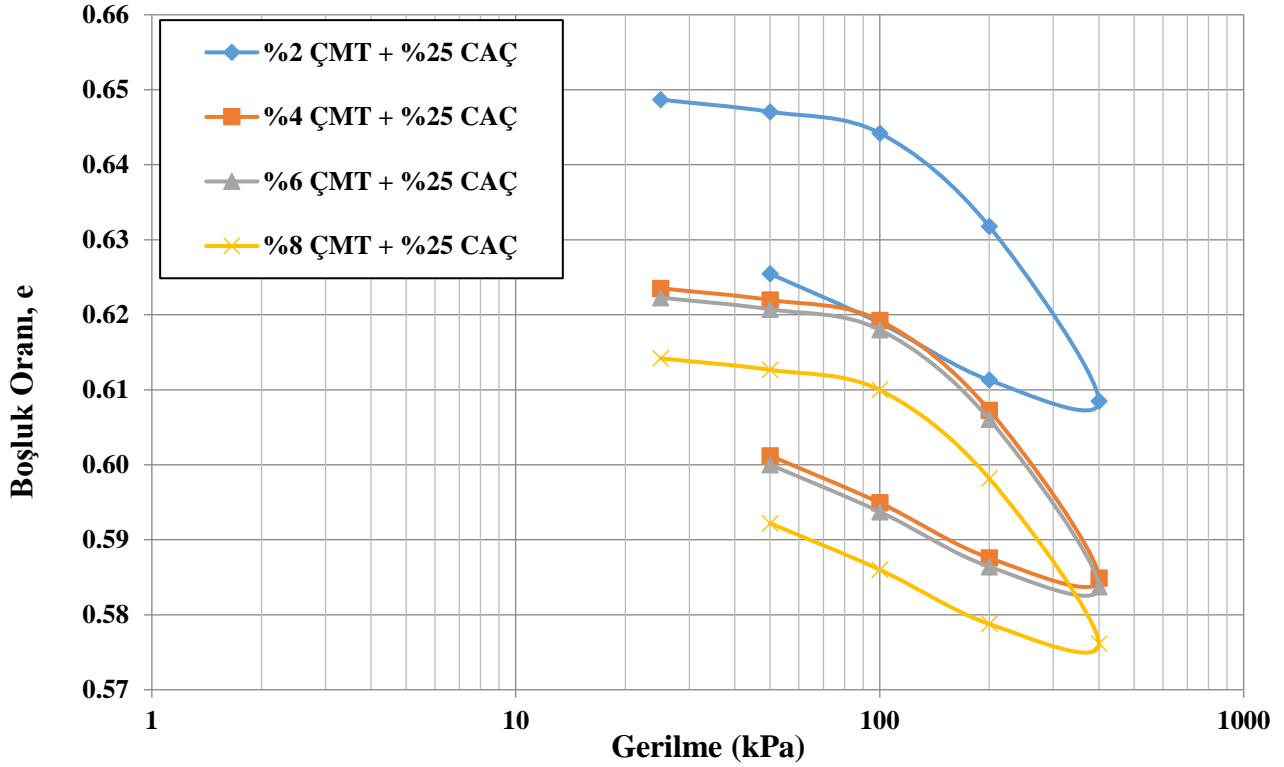


Şekil 5. CI ve farklı CAÇ oranları için boşluk oranı-gerilme grafikleri



Şekil 6. Farklı ÇMT oranları için boşluk oranı-gerilme grafikleri

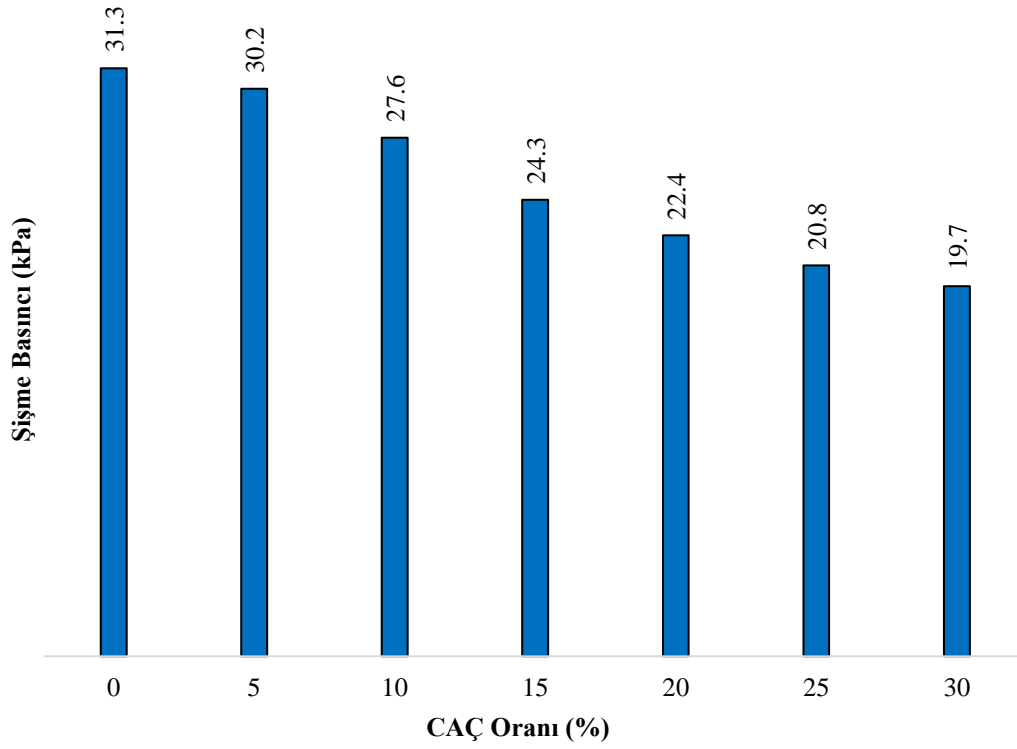
Şekil 7' de ise, ideal CAÇ oranında ve farklı ÇMT oranlarında hazırlanan killi zeminin boşluk oranında meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Sonuçlara göre, 25 kPa gerilme kademesinden 400 kPa gerilme kademesine kadar, boşluk oranları sırasıyla 0.649' dan 0.608' e, 0.624' den 0.585' e, 0.622' den 0.584' e ve 0.614' den 0.576' ya düşmüştür.



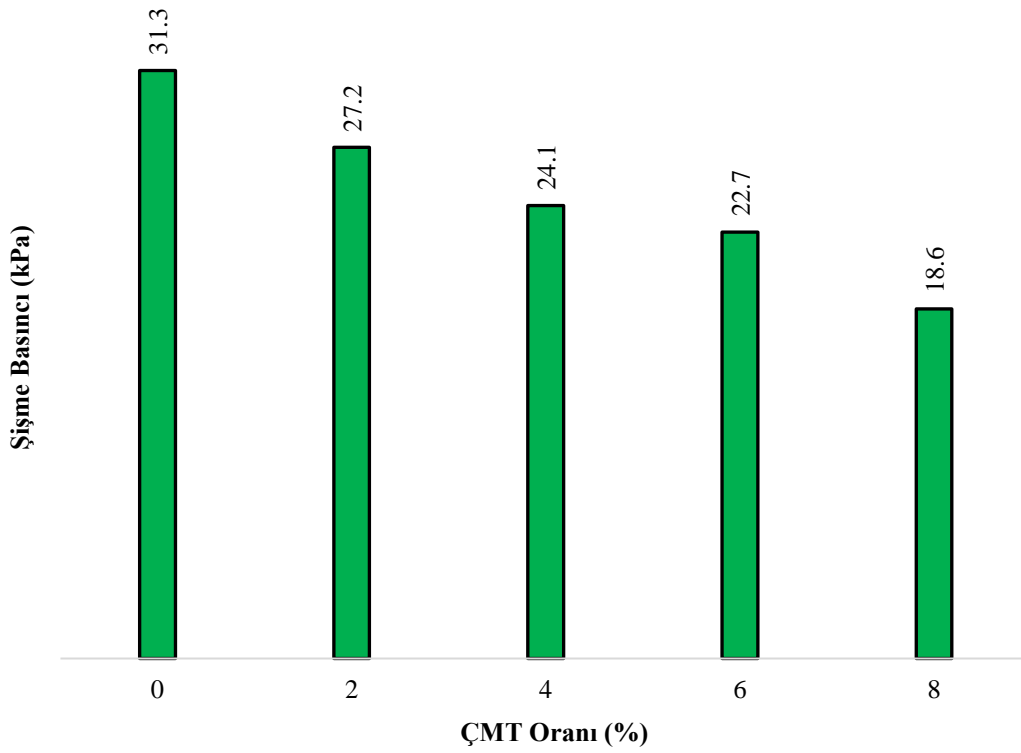
Şekil 7. %25 CAÇ ve farklı ÇMT oranları için boşluk oranı-gerilme grafikleri

ÇMT ve CAÇ katkılarının ortak kullanımı, killi zeminin zamana bağlı boşluk oranlarında yaklaşık olarak 1.45 kata varan azalmalar meydana getirmiştir. CAÇ ve ÇMT karışımlarında, %25 CAÇ ve %6 ÇMT' nin en iyi oranlar olduğu belirlenmiştir. Zeminde zamana bağlı boşluk oranlarının azaltılmasında en iyi sonucu, CAÇ ile ÇMT' nin ortak kullanımı vermiştir. Artan gerilme kademelerine bağlı olarak, boşluk oranının azaltılması ile zemin daha sıkı hale gelmektedir. Böylece, zeminin taşıma gücü artarak zamana bağlı meydana getireceği oturma miktarı da düşecektir. Şekil 8, 9 ve 10' da sırasıyla, CAÇ, ÇMT ve CAÇ-ÇMT katkıları eklenmiş CI zeminler için şişme basınçları görülmektedir. Sadece CAÇ, sadece ÇMT ve CAÇ-ÇMT karışımları kullanılması durumlarında, şişme basınçlarında sırasıyla 1.60 kata, 1.68 kata ve 2.22 kata varan azalmalar meydana gelmiştir. Şişme basıncının azalmasında en iyi sonuç, CAÇ ve ÇMT' nin birlikte kullanılması ile elde edilmiştir. CI zeminlerin su ile teması halinde, üzerlerine gelen yapı yükleri nispeten hafif ise, zemin şişme davranışı sergileyecektir. Bu durumda da üst yapıda istenilmeyen hasarlar oluşacaktır. Bu katkıların kullanımı ile hem atıklar bertaraf edilmekte hem de şişme basınçları istenilen düzeylere getirilmektedir.

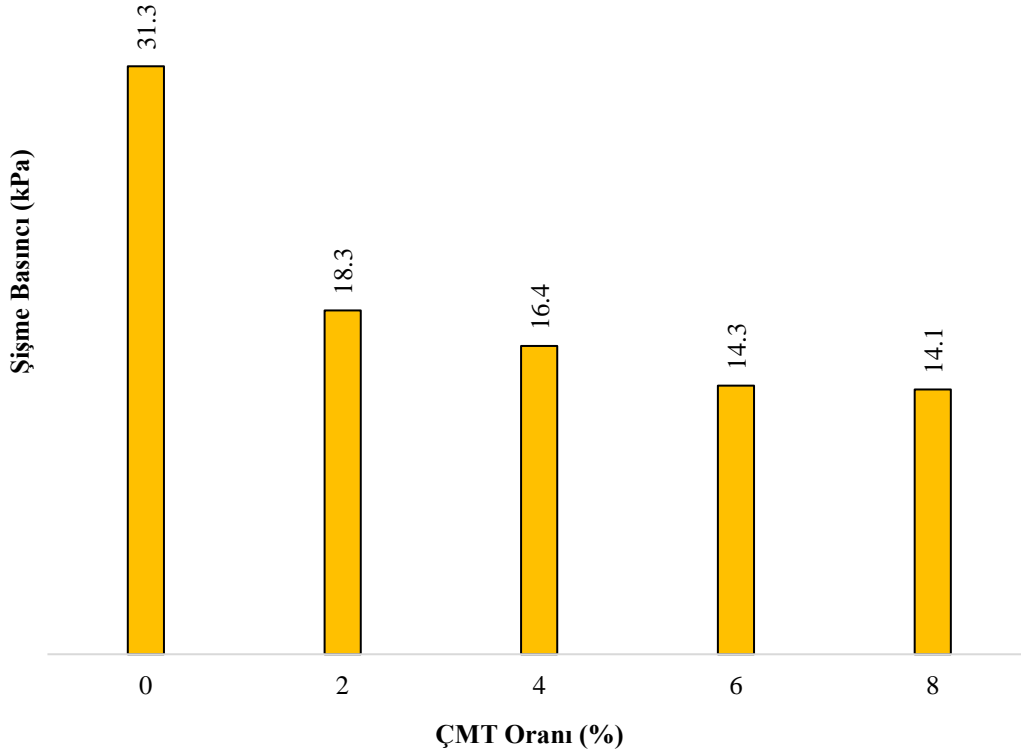
Öte yandan, sadece CI, %25 CAÇ, %6 ÇMT ve %25 CAÇ-%6 ÇMT kullanılması durumlarında, karışım numunelerinde ulaşılan şişme basıncı değerleri Şekil 11' de görülmektedir. Şekil 11' in incelenmesi sonucunda fark edilebilir ki, killi zemine %25 oranında cam atığı eklenince zeminin şişme potansiyeli ciddi bir şekilde azalmaktadır. Burada bahsedilen şişme potansiyeli düşüşü, Şekil 11' den de gözlemlenebileceği gibi, ideal oranlarda çimento eklenmesi sonucu ortaya çıkan durumdan bile daha iyi sonuç vermektedir. İlave olarak, cam atığı ile çimentonun en iyi olduğu belirlenmiş olan oranlarda zemine eklenmesi sonucu ulaşılan şişme azalması, son derece dikkat çekici oranlarda gerçekleşmektedir. Bu sebepler bir arada irdelenecek olursa, sonuç olarak, çalışmada ele alınmış olan cam atığının hem çimento yakını oranlarda iyileşmeler sağlaması ve çimento gibi popüler katkılarla beraber kullanımında çok iyi sonuçlar vermesi hem de pahalı kimyasal katkıların yerine geçebilme potansiyeli doğurarak oldukça daha ekonomik çözümlere ulaşım sağlaması gibi sebeplerle, zemin iyileştirme çalışmalarında değerlendirilebileceği fikri ortaya çıkmaktadır.



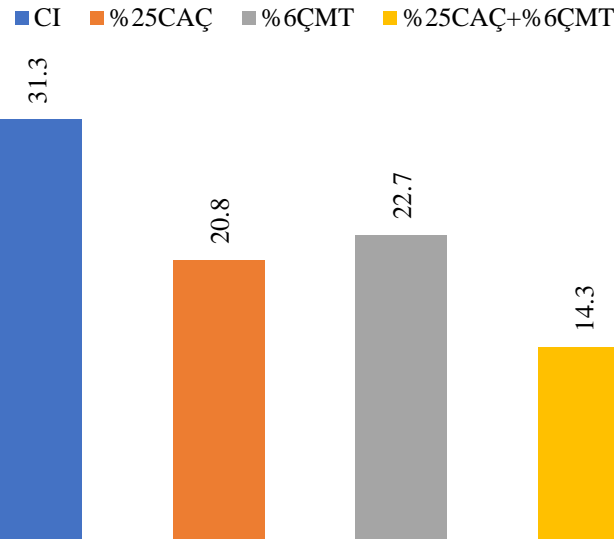
Şekil 8. CI ve farklı CAÇ oranları karışımları için şişme basınçları



Şekil 9. CI ve farklı ÇMT oranları karışımları için şişme basınçları



Şekil 10. CI, %25 CAÇ ve farklı ÇMT oranları karışımları için şişme basınçları



Şekil 11. CI, %25 CAÇ, %6 ÇMT ve %25 CAÇ+%6 ÇMT için şişme basınçları

4. Sonuçlar

Çalışmada, kil zemine (CI) belirli oranlarda cam atık çamuru (CAÇ) ve çimento (ÇMT) ilavesi ile hazırlanmış olan numunelerde oluşan mukavemet, konsolidasyon ve şişme parametrelerinin değişimlerinin araştırılmasına yönelik bir seri deney yapılmıştır. İlk olarak, kil zemine %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında CAÇ ilave edilerek serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonrasında, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında CAÇ, %2, %4, %6 ve %8 oranlarında ÇMT ve optimum orandaki CAÇ-%2, %4, %6 ve %8 oranlarında ÇMT ilavesi ile oluşturulan numuneler üzerinde konsolidasyon ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Son olarak, optimum değerlerde belirlenen CAÇ, ÇMT ve CAÇ-ÇMT oranlarında şişme basıncı deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- CI içerisinde, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında CAÇ eklenmesi durumunda, serbest basınç mukavemetlerinde, her bir oran için sırasıyla 1.14, 1.36, 1.79, 2.16, 2.59 ve 2.60 oranlarında artışlar meydana gelmiştir. Ayrıca, ideal olarak tanımlanan %25 oranındaki CAÇ ile hazırlanan CI'ye, %2, %4, %6 ve %8 oranlarında ÇMT eklenmesi durumunda, serbest basınç mukavemetlerinde her oran için sırasıyla 2.70, 2.87, 3.05 ve 3.22 oranlarında artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Buradan, CI'nin serbest basınç mukavemetinin CAÇ ile artırılabilirliği belirlenmiştir. Ayrıca, ilave ÇMT etkisiyle de serbest basınç mukavemetlerinin daha da artırılabilirliği saptanmıştır.
- 25 kPa' dan 400 kPa' a kadar olan gerilme kademeleri için, zamana bağlı boşluk oranlarında, CI içerisinde %5-%30 arası oranlarda CAÇ eklenmesi durumunda 1.17, %2-%8 arası oranlarda ÇMT eklenmesi ile 1.44 ve ÇMT ile CAÇ' nin birlikte kullanımıyla (%25 CAÇ ve %2-%8 ÇMT) 1.45 kata varan azalmalar meydana geldiği tespit edilmiştir.
- Bu tür killerde, zeminin zamana bağlı oturmalarındaki azalmalar için, %25 CAÇ ve %6 ÇMT oranlarının kullanımının en ideal seçim olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, her iki katkının ideal oranlarda aynı anda kullanılması ile de en iyi sonuçların elde edileceği görülmüştür.
- Sadece CAÇ, sadece ÇMT ve CAÇ-ÇMT kullanılması durumlarında, şişme basınçlarında sırasıyla 1.60 kata, 1.68 kata ve 2.22 kata varan azalmalar meydana gelmiştir. Yine, şişme basıncındaki en iyi azalma, CAÇ ve ÇMT' nin birlikte kullanılması (%25 CAÇ ve %6 ÇMT) ile elde edilmiştir.
- Sonuç olarak, CI'lerin serbest basınç mukavemetleri, zamana bağlı oturmalar, boşluk oranı değişimleri ve şişme basınçları gibi parametrelerin iyileştirilmesinde, hem CAÇ' nin tek başına hem de CAÇ ve ÇMT' nin bir arada başarılı bir şekilde kullanılabilirliği belirlenmiştir.

Referanslar

- Abbaspour M., Aflaki E., Nejad F. M., (2019). Reuse of waste tire textile fibers as soil reinforcement. *Journal of cleaner production*, 207, 1059-1071.
- Akbarimehr D., Aflaki E., Eslami A., (2019). Experimental investigation of the densification properties of clay soil mixes with tire waste. *Civil engineering journal*, 5(2), 363-372.
- Arulrajah A., Mohammadjavad Y., Mahdi M. D., Suksun H., Myint W. B., Melvyn L., (2018). Evaluation of fly ash and slag-based geopolymers for the improvement of a soft marine clay by deep soil mixing. *Soils and Foundations*, 58(6), 1358-70. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.07.005>.
- Ateş A., (2016). Mechanical properties of sandy soils reinforced with cement and randomly distributed glass fibers (GRC). *Composites Part B: Engineering* 96, 295-304. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.04.049>.
- Ayininuola G., Ayodeji I., (2016). Influence of Sludge Ash on Soil Shear Strength. *Journal of Civil Engineering Research*, 6(3), 72-77.
- Ayodele A. L., Adebisi A. O., Kareem M. A., (2016). Use of Sludge Ash in Stabilising Two Tropical Laterite. *Int. J. Sci. Eng. Res.*, 7.
- Badrawi E. F., El-kady M. S., (2019). Stabilizing soft clay using geo-foam beads and cement bypass dust. *Underground Space* [https://doi.org/10.1016/j.jundsp\(2019\)05003](https://doi.org/10.1016/j.jundsp(2019)05003).
- Bagrıaçık B., Mahmutluoğlu B., (2020). A new experimental approach to the improvement of sandy soils with construction demolition waste and cement. *Arab J Geosci*, 13, 539. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05493-6>.
- Basha E. A., Hashim R., Mahmud H. B., Muntohar A. S., (2005). Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. *Constr. Build. Mater.*, 19(6), 448-453.
- Bell F. G., (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering geology*, 42(4), 223-37.
- Bilondi M. P., Mohammad M. T., Vahid T., (2018). Experimental investigation of using a recycled glass powder-based geopolymer to improve the mechanical behavior of clay soils. *Construction and Building Materials*, 170, 302-13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.049>.
- Biradar K. B., Arun K. U., Satyanarayana P. V. V., (2014). Influence of steel slag and fly ash on strength properties of clayey soil: A comparative study. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*- (14) (2). <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V14P213>.
- Brooks R. M., (2019). Soil stabilization with fly ash and corn waste ash—improvements in engineering characteristics. *Int. J. Appl. Eng. Res.*, 14(4), 1025-1030.

- Chang I., Jooyoung I., Moon-Kyung C., Gye-Chun C., (2018). Bovine casein as a new soil strengthening binder from diary wastes. *Construction and Building Materials*, 160, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.009>.
- Cokca E., Yazici V., Ozaydin K., (2009). Stabilization of expansive clays using granulated blast furnace slag (GBFS) and GBFS-cement. *Geotech. Geol. Eng.*, 27(4), 489.
- Corrêa-Silva M., Nuno A., Nuno C., Tiago M., António T. G., Coelho J., (2018). Improvement of a clayey soil with alkali activated low-calcium fly ash for transport infrastructures applications. *Road Materials and Pavement Design*: 1-15. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1473286>.
- de Figueiredo Lopes Lucena L. C., ThoméJuca J. F., Soares J. B., Portela M. G., (2014). Potential uses of sewage sludge in highway construction. *Journal of materials in civil engineering*, 26(9), 04014051.
- Esmailpour S. N., Abbasali T. G., Mohammadreza K. T., Asskar J. C., (2019). Improvement of the engineering behavior of sand-clay mixtures using kenaf fiber reinforcement. *Transportation Geotechnics*, 19, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.01.004>.
- Fauzi A., Zuraidah D., Usama J. F., (2016). Soil engineering properties improvement by utilization of cut waste plastic and crushed waste glass as additive. *International Journal of Engineering and Technology*, 8(1), 15. <https://doi.org/10.7763/IJET.2016.V8.851>.
- Gu K., Chen B., (2020). Loess stabilization using cement, waste phosphogypsum, fly ash and quicklime for self-compacting rammed earth construction. *Construction and Building Materials*, 231:117195.
- Gupta C., Sharma R. K., (2014). Influence of marble dust, fly ash and beach sand on sub-grade characteristics of expansive soils. *International Conference on Advances in Engineering and Technology*, 13-18.
- Güllü H., (2014). Factorial experimental approach for effective dosage rate of stabilizer: Application for fine-grained soil treated with bottom ash. *Soils and Foundations*, 54(3), 462-477.
- Hasan H., Dang L., Khabbaz H., Fatahi B., Terzaghi S., (2016). Remediation of expansive soils using agricultural waste bagasse ash. *Procedia Eng.*, 143, 1368-1375.
- James J., Pandian P. K., (2016). Industrial wastes as auxiliary additives to cement/lime stabilization of soils. *Adv. Civ. Eng.*, 1-17.
- Jin L. M., MohdYunus N. Z., Hezmi M. A., Rashid A. S. A., Marto A., Kalatehjari R., Pakir F., Mashros N., Ganiyu A., (2018). Predicting the Effective Depth of Soil Stabilization for Marine Clay Treated by Biomass Silica. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(11), 4316-4326. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-1294-x>.
- Keerthi Y., Divya Kanthi P., Tejaswi N., Shyam Chamberlin K., Satyanarayana B., (2013). Stabilization of clayey soil using cement kiln waste. *Int. J. Adv. Struct. Geotech. Eng.*, 2(2), 77-81.
- Kianimehr M., Piltan T. S., Seyed M. B., Alireza M., Arul A., (2019). Utilization of recycled concrete aggregates for light-stabilization of clay soils. *Construction and Building Materials*, 227, 116792.
- Kumar A., Gupta D., (2016). Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced pond ash, rice husk ash–soil mixtures. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(3), 466-74. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.05.010>.
- Kumar A., Sivapullaiah P. V., (2012). Improvement of strength of expansive soil with waste granulated blast furnace slag. In *Geo Congress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering*, 3920(8). <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V11P254>.
- Lin D. F., Lin K. L., Luo H. L., (2007). A comparison between sludge ash and fly ash on the improvement in soft soil. *J. Air Waste Manage*, 57(1), 59-64.
- Liu Y., Chang C. W., Namdar A., She Y., Lin C. H., Yuan X., Yang Q., (2019). Stabilization of expansive soil using cementing material from rice husk ash and calcium carbide residue. *Construction and Building Materials*, 221, 1-11.
- Long G., Li L., Li W., Ma K., Dong W., Bai C., Zhou J. L., (2019). Enhanced mechanical properties and durability of coal gangue reinforced cement-soil mixture for foundation treatments. *Journal of cleaner production*, 231, 468-482.

- Mahmutluoglu B., Bagriacik B., (2021). Sustainable implementation of glass manufacturing waste and geogrids in the improvement of fine-grained soils. *KSCE J Civ Eng* 00(0), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-1344-7>.
- MohdYunus N. Z., Wanatowski D., Abdul Hassan N., Marto A., (2016). Shear strength and compressibility behavior of lime treated organic clay. *KSCE Journal of Civil Engineering*, KSCE, 20(5), 1721-1727. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-1294-x>.
- Naseem A., Mumtaz W., De Backer H., (2019). Stabilization of expansive soil using tire rubber powder and cement kiln dust. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 56(1), 54-58.
- Pastor J. L., Tomás R., Cano M., Riquelme A Gutiérrez E., (2019). Evaluation of the improvement effect of limestone powder waste in the stabilization of swelling clayey soil. *Sustainability*, 11(3), 679.
- Pourakbar S., Afshin A., Bujang B. K. H., Mohammad H. F., (2015). Stabilization of clayey soil using ultra fine palm oil fuel ash (POFA) and cement. *Transportation Geotechnics*, 3, 24-35. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.01.002>.
- Ramakrishna A. N., Pradeepkumar A. V., (2006). Stabilization of black cotton soil using rice husk ash and cement. In *National Conference on Civil Engineering Meeting the Challenges of Tomorrow*, GND Engineering College, Ludhiana, 215-220.
- Shah S. A. R., Mahmood Z., Nisar A., Aamir M., Farid A., Waseem M., (2020). Compaction performance analysis of alum sludge waste modified soil. *Construction and Building Materials*, 230, 116953.
- Sharma R. S., Phanikumar B. R., Rao B. V., (2008). Engineering behavior of a remolded expansive clay blended with lime, calcium chloride and rice- husk ash. *Jnl. of Mat. in Civil Eng*, 20(8), 509-515.
- Taki K., Choudhary S., Gupta S., Kumar M., (2020). Enhancement of geotechnical properties of municipal sewage sludge for sustainable utilization as engineering construction material. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119-723.
- Tremblay H., Josée D., Jacques L., Serge L., (2002). Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(3), 535-46.
- TS 1500, (2000): İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması, Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
- TS 1900-1, (2006): İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
- TS 1900-2, (2006): İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri - Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
- Ural N., Karakurt C., Cömert A. T., (2014). Influence of marble wastes on soil improvement and concrete production. *J. Mater Cycles Waste Manag.*, 16, 500–508. <https://doi.org/10.1007/s10163-013-0200-3>.
- Yadav J. S., Hussain S., Tiwari S. K., Garg A., (2019). Assessment of the load–deformation behavior of rubber fibre–reinforced cemented clayey soil. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 6(2), 105-136.
- Yokohama S., Sato A., (2019). Cyclic mechanical properties of sandy soils by mixing recycled asphalt pavement material. *International Journal*, 16(58), 41-47.
- Zainuddin N., Yunus N. Z. M., Al-Bared M. A. M., Marto A., Harahap I. S. H., Rashid A. S. A., (2019). Measuring the engineering properties of marine clay treated with disposed granite waste. *Measurement*, 131, 50-60.
- Zhan T. L., Zhan X., Lin W., Luo X., Chen Y., (2014). Field and laboratory investigation on geotechnical properties of sewage sludge disposed in a pit at Changan landfill, Chengdu, China. *Engineering geology*, 170, 24-32.



Epoksi Emdirilmiş Karbon Lifi Sargılı Çelik Donatıların Aderans Dayanımı

Bond Strength of Epoxy Impregnated Carbon Fiber Wrapped Steel Reinforcement

Erkan Türkmen Dönmez¹, Boğaçhan Başaran²

¹Amasya Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Tasarım Bölümü, 05100, Amasya, TÜRKİYE

²Amasya Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, İnşaat Bölümü, 05100, Amasya, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 15/03/2021

Kabul / Accepted: 29/04/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 02/06/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Çelik donatıların korozyon sorunu ile FRP donatıların düşük elastisite modülü ve gevrek gerilme-şekil değiştirme davranışlarına karşı geliştirilen çelik-FRP kompozit donatıların beton yapı elemanlarında kullanılmalarının araştırılması çok sınırlı kalmıştır. Özellikle de yapı elemanlarının sünekliğini, enerji sönümleme ve taşıma kapasitesini önemli oranda etkileyen donatı-beton aderansı konusunda daha fazla araştırma yapılması gereklidir. Çünkü çelik-FRP kompozit donatılar, sertliği ve sünekliği birbirlerinden çok farklı iki malzemeden üretildiği için malzemenin kendi içindeki uyumu bu donatıların aderans davranışlarını etkilemektedir. Bu kapsamda, bu çalışmada, epoksi emdirilmiş karbon lifinin çelik donatı üzerine filaman sarım tekniğiyle 30 derece sarılmasıyla üretilen ve yüzeyine herhangi bir deformasyon işlemi uygulanmış kompozit donatıların beton ile aralarındaki aderans dayanımları çekip çıkarma deneyleriyle araştırılmıştır. Elde edilen bulgular literatürdeki salt çelik donatıların, salt karbon FRP donatıların ve çelik-bazalt, çelik-karbon, çelik-cam FRP donatıların aderans dayanımları ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda karbon FRP sargılı çelik kompozit donatıların yüzeyinde herhangi bir deformasyon işlemi olmamasına rağmen ortalama bir aderans dayanımına ve düz, kumlanmış, demet ve örgülü yüzey özelliğine sahip donatılardan da daha iyi bir aderans dayanımına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Karbon lifi, karbon lifi takviyeli çelik donatı, hibrit donatı, kompozit, çekip çıkarma deneyi, FRP donatı, CTP, Aderans dayanımı”

Abstract

The use of steel-FRP composite reinforcement developed against the corrosion problem of steel reinforcements and the low elastic modulus and brittle stress-strain behavior of FRP reinforcement in concrete structural members has been investigated rather limitedly in the literature. More research is needed especially on the bond behavior of reinforcement in concrete which significantly affects the ductility, energy absorption capacity and load-bearing capacity values of structural members. Because steel-FRP composite reinforcing bars are produced from two materials whose hardness and ductility values are very different from each other, the compatibility of the material within itself affects the bonding behavior of this reinforcement. In this context, the bond strengths of composite reinforcing bars produced by wrapping epoxy-impregnated carbon fibers on steel reinforcement with filament winding technique at 30 degrees and without any deformation process on the surface were investigated through pullout tests. The test results of these bars were compared with the bond strengths of steel, CFRP and steel-basalt, steel-carbon, steel-glass FRP reinforcing bars in the literature. The study showed that the carbon FRP wrapped steel composite bars have better bond strength values than the reinforcing bars with smooth, sand-coated, strand and braided surface textures, although there is no deformation on the surface of these new bars.

Key Words

“Carbon fibre, Carbon fibre reinforced steel bar, hybrid rebar, composite, pull-out test, FRP reinforcement bar, GFRP, bond strength”

1. Giriş

Günümüzde inşaat, otomotiv, havacılık, savunma vb. birçok sektörde kompozit malzemelerin kullanımları mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin istenilen şekilde ayarlanabilmesinden dolayı gittikçe yaygınlaşmakta ve geleneksel tek bileşenden oluşan malzemelerin yerlerini almaktadırlar. Bu malzemelerden birisi lif takviyeli polimerlerdir (FRP). FRP malzemeler, lif (cam, karbon, bazalt, aramid) ve reçine (epoksi, polyester, vinil ester) olmak üzere iki bileşenden meydana gelmektedir. Dolayısıyla içerisinde kullanılan lif ve reçine özelliklerine göre mekanik özellikleri ve dayanıklılıkları tasarım şartlarına göre düzenlenebilmektedir. FRP malzemeler betonarme yapı elemanlarında genellikle donatı, plaka, ve kumaş formunda kullanılmaktadır. Bu formlardan FRP kumaş ve plakalar genellikle yapı elemanlarının onarım ve güçlendirilmesinde yapı elemanlarının kesme ve eğilme dayanımlarını artırmak için kullanılırlar (Gemi vd., 2019; Aksoylu vd., 2020). FRP donatılar ise betonarme elemanlarda genellikle çekme donatısı olarak betonun çekme dayanımını güçlendirmek amacıyla kullanılmaktadırlar (Kartal, 2020). FRP donatılar çelik donatılara göre, korozyona karşı dayanıklı olmaları, hafif olmaları, çekme dayanımlarının yüksek olması vb. nedenlerden dolayı tercih edilmektedirler. Ancak düşük elastisite modülü ile kesme dayanımları yanında gevrek davranışlarından dolayı bazı dezavantajlara sahiptirler. Buna karşın, her ne kadar çelik donatılar FRP donatılara kıyasla düşük korozyon dayanımı gösterse de süneklik, yüksek çekme ve basınç elastisite modülü ve dayanımı gibi özellikler sergilemesinden dolayı önemli avantajlara sahiptir. (ACI 440.1R-15, 2015; ACI 440R-07, 2007; Design Manual No. 3, 2007).

Son zamanlarda araştırmacılar, bu iki malzemenin birbirlerine göre mevcut olan dezavantajlarını avantaja dönüştürebilmek için çeşitli oranlarda ve çaplarda kullanıp farklı üretim tekniklerini deneyerek yeni çelik-FRP kompozit donatılar geliştirmişlerdir. Bu geliştirilen kompozit donatılarda kullanılan FRP kaplama ile çeliğin korozyon dayanımının artırılması, çekirdekte kullanılan çelik ile de FRP donatıların gevrek davranışlarının ve elastisite modüllerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır (Basaran & Donmez, 2020; Cheung & Tsang, 2010; Ju vd., 2017; Seo vd., 2016; Wang vd., 2020). Ancak geliştirilen kompozit donatıların beton yapı elemanları içinde kullanılmasına yönelik yapılan araştırmaların sayısı çok sınırlı kalmıştır. Özellikle de yapı elemanlarının sünekliğini, enerji sönümleme ve taşıma kapasitesini önemli oranda etkileyen donatı-beton aderansı (tutunma) konusunda çok daha fazla araştırma yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır (Lin & Zhang, 2013; Soric vd., 2010). Çünkü bu donatıların dış katmanı çelik donatı üzerine FRP'nin sarılması/örülmesi/çekilmesi ile üretilmektedir. Dolayısıyla salt FRP donatılar ile beton arasındaki aderansın paspayı, beton basınç dayanımı, donatı çapı, lif türü, yüzey deformasyon şekli vb. birçok faktöre bağlı olduğu düşünüldüğünde (Basaran & Kalkan, 2020; Yan vd., 2016), çelik-FRP donatıların üzerinde FRP'nin bulunmasından ötürü bu donatıların aderans davranışlarının da benzer birçok faktöre bağlı olacağı söylenebilir. Ancak bu donatılar, sertliği ve sünekliği birbirinden çok farklı iki malzemenin üretilmesi için bu kompozit donatının beton içindeki aderans davranışı ayrıca incelenmesi gereklidir.

Beton ile çelik-FRP donatı arasındaki aderans davranışı çok az sayıda araştırmacı tarafından çekip çıkarma deneyleri yapılarak incelenmiştir. Ju vd. 2017 yaptıkları çalışmada kumlanmış ve nervürlü yüzeye sahip çelik-cam FRP donatıların aderans dayanımının çelik donatı dayanımının yaklaşık %90,5'i (yaklaşık 20MPa) olduğunu belirtmişlerdir. Wang vd. (2020) ve Wu vd. (2012) spiral sargılı ve kumlanmış yüzeye sahip çelik-karbon FRP donatıların aderans dayanımlarının sırasıyla yaklaşık ortalama 7-11 MPa ve 15,02 MPa olduğunu, Wu vd. (2012) ve Ma vd. (2019) ise spiral sargılı ve kumlanmış yüzeye sahip çelik-bazalt FRP donatıların aderans dayanımlarının sırasıyla ortalama 15,38 ve 15,57 MPa olduğunu belirtmişlerdir. Ancak araştırmacıların inceledikleri donatılar genellikle çelik donatı üzerine FRP'nin çekilmesinden (pultrüzyon) sonra yüzey deformasyon uygulaması (sargı, kumlama vb.) yapılarak üretilmiştir. Pultrüzyon yöntemi termoset reçine banyosundan geçirilen filament liflerin sürekli çekilmesi yöntemine dayanmaktadır (Madenci vd., 2020a). Bu yöntem ekonomik, hızlı ve kolay olmasından dolayı FRP üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır (Madenci vd., 2020b). Ancak bu yöntem ile üretilen FRP donatıların süneklikleri sınırlı olmaktadır. Bu çalışmada ise epoksi emdirilmiş karbon lifinin çelik donatı üzerine 30 derece sarılmasıyla (filaman sarım) üretilen ve yüzeyine herhangi bir deformasyon işlemi uygulanmamış kompozit donatıların beton ile aralarındaki aderans dayanımları 9 adet çekip çıkarma deneyi ile araştırılmıştır. Araştırma sonucunda elde edilen bulgular literatürdeki çelik donatı, karbon FRP donatı ve çelik-FRP (bazalt, karbon, cam FRP) donatıların beton ile aralarındaki aderans dayanımları ile karşılaştırılmıştır.

2. Deneysel Çalışma

2.1. Malzemelerin Özellikleri

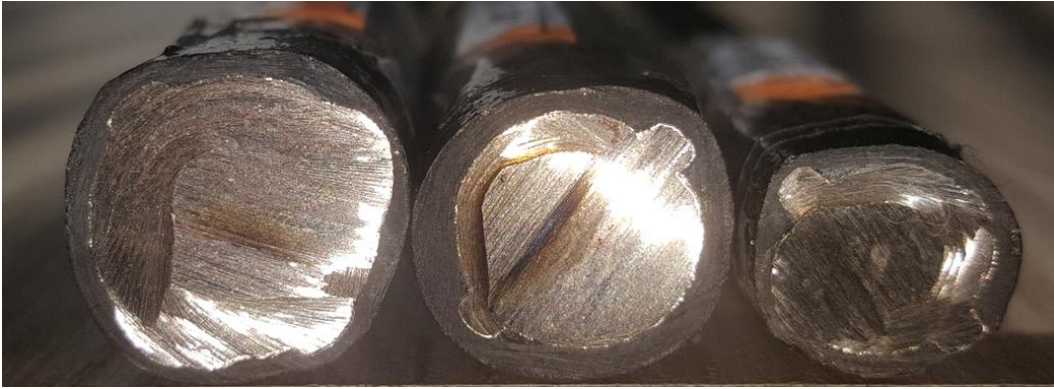
Donatılar

Çalışmada kullanılan kompozit donatıların üretilmesi için genellikle kompozit boru üretiminde sıklıkla kullanılan filament sarım (filament winding) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, reçine emdirilmiş fitillerin sabit bir hızda dönen mandrele açılı olarak sarılması yöntemine dayanmaktadır. Bu çalışmada ise epoksi emdirilmiş 0,3 mm çapındaki karbon fitiller, mandrel yerine nervürlü çelik donatı üzerine açılı bir şekilde iki katman sarılarak donatılar üretilmiştir. FRP'lerin gevrek gerilme-birim deformasyon davranışının engellenebilmesi ve donatının çekme sünekliğinin artırılabilmesi için filament lifler çelik donatıya 30 derecelik açıyla sarılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Donatıların üretimi

Sarımı tamamlanan donatılar kürlleme fırınında 2 saat 80°C'de ve ardından 2 saat 120°C'de iki kademeli kürlleme işlemine tabi tutulmuştur. Çalışmada kullanılan karbon fitillerini oluşturan karbon lifler ile epoksi reçinenin fiziksel ve mekanik özellikleri üretici firmaların katalog verilerinden temin edilmiş olup sırasıyla Tablo 1 ve 2'de sunulmuştur. Üretimi tamamlanan donatılar ise Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Karbon FRP sargılı çelik donatılar

Tablo 1. Epoksi reçinenin fiziksel ve mekanik özellikleri

Özellik	Değer
Çekme dayanımı (MPa)	61
Kopma uzaması (%)	2,00
Elastisite modülü (GPa)	3,64
Yoğunluk (g/cm ³)	1,18
Shore D sertliği	76
Camsı geçiş sıcaklığı (°C)	123

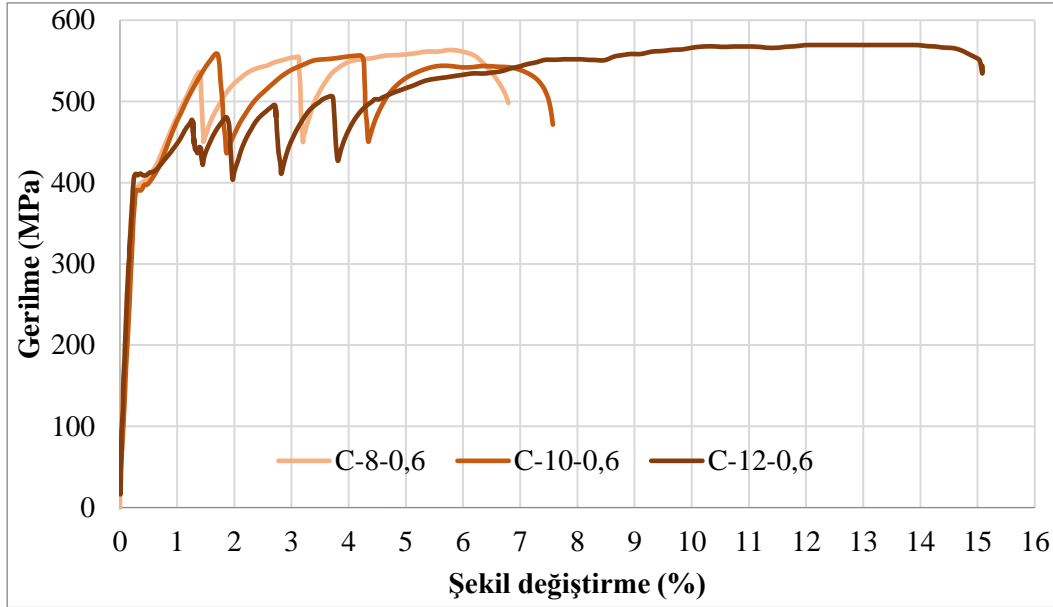
Tablo 2. Karbon lifinin fiziksel ve mekanik özellikleri

Özellik	Değer
Çekme dayanımı (MPa)	3500
Kopma uzaması (%)	1,50
Elastisite modülü (GPa)	230
Elyaf çapı (µm)	7±2
Yoğunluk (g/cm ³)	1,85

Çalışma için üretilen donatıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla karbon FRP sargılı çelik donatılar çekme testine tabi tutulmuştur. Çekme deneyleri, deney çekme hızı dakikada 2,5 mm olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan donatıların fiziksel özellikleri ile çekme testleri sonuçları Tablo 3'de sunulmuştur. Çekme testleri sonucunda karbon FRP sargılı çelik donatılar, karbon FRP'nin katkısı nedeniyle oluşan çeliğin akma sahanlığındaki azalmadan dolayı yalancı-sünek (pseudeu-ductile) davranış göstermişlerdir (Şekil 3). Donatının yalancı sünek davranış göstermesiyle donatı FRP'nin bölgesel kopma yük düşüşüne kadar bir bütün davranış göstermiş ve nihai kopmadan önce ani bir gevrek kopma yerine FRP'nin bölgesel kopmalarıyla net uyarı gösteren aşamalı hasar görmüştür. Donatıların yalancı-sünek davranış göstermelerinden dolayı akma dayanımları bulunurken yalancı sünek malzemelerde kullanılan %0,1 öteleme (ofset) yönteminden yararlanılmıştır (Wisnom, 2016).

Tablo 3. Üretilen donatıların fiziksel ve mekanik özellikleri

Deney Numunesi	Lif türü	Nervürlü donatı dış çapı (mm)	Lif sarma kalınlığı (mm)	Kompozit donatı dış çapı, Φ (mm)	Akma Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
C-8-0.6	Karbon	8,17	0,60	9,37	398,96	111,75
C-10-0.6	Karbon	10,16	0,60	11,36	391,28	104,06
C-12-0.6	Karbon	12,28	0,60	13,48	410,84	117,60

**Şekil 3.** Karbon FRP sargılı çelik donatıların gerilme-şekil değiştirme davranışları

Beton

Çekip çıkarma deney numunelerinde kullanılan tüm betonların karışım hesapları TS 802 (2016) standardına göre, maksimum agrega çapı 16mm olan kırmataş kullanılarak, C25/30 sınıfı beton için karışım tasarımı yapılmıştır. Buna ilaveten beton karışımında CEM I 42.5N tipi çimento, S/Ç oranı 0,60 olarak seçilmiştir. Çalışma kapsamında, üretilen beton numuneleri ve numunelerin karışım hesaplarında kullanılan malzeme miktarları ve oranları Tablo 4'de sunulmuştur.

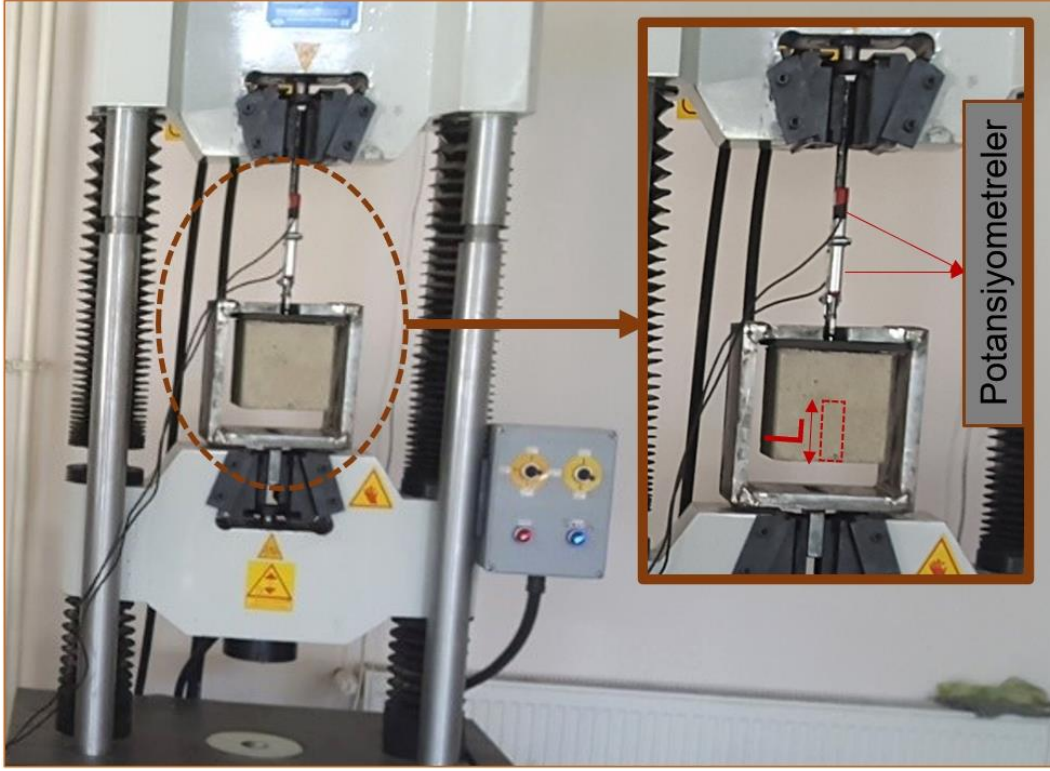
Tablo 4. 1 m³ hacmindeki betonun karışım oranları (kg/m³)

İri agrega (5-15 mm)	İnce agrega (0-5 mm)	Su (kg)	Çimento (kg)	Birim hacim kütle (kg/m ³)
550	1300	180	300	2330

Deneylerde kullanılan 150x150x150 mm³'lük betonlar EN 12390-2 (2009) standardına göre en az 28 gün kürlenmişlerdir. Kürünü tamamlayan numunelerin beton basınç dayanım testleri TS EN 12390-3 (2009) standardına göre yapılarak ortalama küp beton basınç dayanımları yaklaşık 31 MPa olarak belirlenmiştir.

2.2. Yöntem

Çalışmada çekip çıkarma deney numunelerinin hazırlanabilmesi ve daha önce yapılan çalışmalar ile karşılaştırmaların daha doğru yapılabilmesi için 150x150x150 mm³'lük boyutlara sahip kalıplar kullanılmıştır. Donatılar bu kalıplara beton temas boyu 5 Φ (L) olacak şekilde merkezlendikten sonra, hazırlanan beton karışımları kalıplara dökülmüştür. Çalışmada çekip çıkarma deney numuneleri hazırlanırken her deney değişkeni için üç adet olmak üzere toplamda 9 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan deney numuneleri 28 gün laboratuvar şartlarında bekletildikten sonra deneylere başlanmıştır. Deneylerde 600 kN kapasiteli çekme cihazı yeniden düzenlendikten sonra kullanılmıştır. Çekme cihazının alt çenesinin numuneyi tutabilmesi için cihazın alt çenesinin tutabileceği bir şekilde çelik kafes yapılmıştır. Çelik kafes deneyler sırasında herhangi bir deformasyona uğramayacak şekilde tasarlanmıştır. Deneyler donatı çekme hızı dakikada 2 mm olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında karbon FRP sargılı çelik donatıların betondan sıyrılma uzunluğu ise numunelerin yüklemeye ucuna takılan iki adet 0,01 mm hassasiyete ve sırasıyla 50 ve 100 mm ölçüm uzunluğuna sahip potansiyometreler ile ölçülmüştür. Deneyler sırasında potansiyometre ve çekme cihazının yük hücrelerinde oluşan gerilim değişimleri yüksek çözünürlüklü bir veri toplama sistemi (16 bit) ile toplanarak sayısal değerlere dönüştürülmüştür. Deney düzeneğinin bir görüntüsü Şekil 4'de sunulmuştur.



Şekil 4. Deney düzeneği

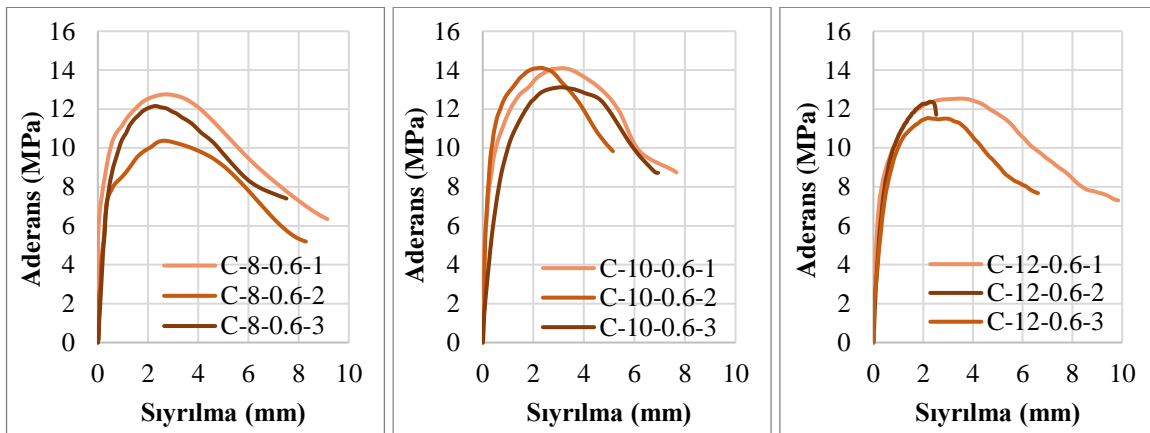
Deneyler sonucunda aderans gerilmesinin belirlenebilmesi için donatıya gelen çekme kuvveti değerleri donatının beton ile temas yüzey alanına bölünerek Denklem (1) ile hesaplanmıştır. Denklem (1)'de aderans gerilmelerinin aderans boyu uzunluğunca homojen yayıldığı varsayılmıştır.

$$u = \frac{F_{\zeta}}{\pi\Phi L} \quad (1)$$

Burada, F_{ζ} = donatıya gelen çekme kuvveti (N); Φ = donatı dış çapı (mm); L =aderans boyu (mm); u = donatı ile beton arasında oluşan aderans gerilmesidir (MPa).

3. Deney Sonuçları

Bu çalışmada karbon FRP sargılı çelik donatılar kullanılarak hazırlanan çekip çıkarma deney numuneleri ile donatı-beton aderansının incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca beton-donatı aderansına donatı çapının ve kompozit donatı içindeki FRP'nin tüm donatıya oranının etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda 9 adet çekip çıkarma deneyi yapılmıştır. Deneylerden elde edilen aderans gerilmesi-sıyırılma eğrileri Şekil 5'de sunulmuştur.



Şekil 5. Donatıların aderans gerilmesi-sıyırılma davranışları

Çekip çıkarma deneyleri sonucunda elde edilen maksimum aderans kuvveti, maksimum aderans dayanım değerleri ve numune göçme şekilleri ise Tablo 5’de sunulmuştur.

Tablo 5. Deney sonuçları

Deney Numunesi	Φ (mm)	A_{FRP}/A	L (mm)	$F_{maks.}$ (N)	$U_{maks.}$ (MPa)	$U_{ort.}$ (MPa)	Göçme Tipi
C-8-0.6-1	9,37	0,24	46,9	17590	12,75	11,76	Sıyırılma
C-8-0.6-2	“	“	“	14303	10,37		Sıyırılma
C-8-0.6-3	“	“	“	16761	12,15		Sıyırılma
C-10-0.6-1	11,36	0,20	56,8	28589	14,10	13,78	Sıyırılma
C-10-0.6-2	“	“	“	28616	14,12		Sıyırılma
C-10-0.6-3	“	“	“	26590	13,12		Sıyırılma
C-12-0.6-1	13,48	0,17	67,4	35786	12,54	12,15	Sıyırılma
C-12-0.6-2	“	“	“	35324	12,38		Yarılma
C-12-0.6-3	“	“	“	32922	11,53		Sıyırılma
Ortalama						12,56	

Deneyler sırasında maksimum aderans gerilmesini ölçebilmek adına donatı ile beton arasındaki temas boyunun kısa bırakılmasından dolayı bir numune haricinde diğer tüm deney numunelerinde sıyırılma göçmesi meydana gelmiştir (Şekil 6.a). Ancak C-12-0.6-1 numaralı numunenin taşıyabildiği çekme kuvvetinin C-12-0.6-2 deney numaralı numuneden daha fazla olmasına rağmen, C-12-0.6-2 deney numaralı numunede yarılma göçmesi oluşmuştur (Şekil 6.b). Bu durumun iki numune arasındaki kuvvet farkının çok az olmasından dolayı, betonun homojenliğinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Hem sıyırılma göçmesiyle hem de betonun yarılma göçmesiyle sonuçlanmış tüm numunelerde karbon FRP sargılı çelik donatıların yüzeyinde gözle görülür herhangi bir deformasyona rastlanmamıştır (Şekil 6.a). Ayrıca donatılar içinde karbon FRP sargı ile çelik donatı arasında herhangi bir deformasyon gözlemlenmemiştir. Bu nedenle çelik donatı ile karbon FRP arasında (sıyırılma olan numunelerde) tam aderans olduğu söylenebilir. Buna ilaveten çekip çıkarma deneyleri esnasında donatılar betondan akma dayanımlarına ulaşmadan sıyırıldıkları için donatı poisson etkilerinin, donatının betondan sıyırılma davranışına etkileri sınırlı kalmıştır.









Şekil 6. (a) Sıyırılma göçmesiyle sonuçlanan deney numunesi; (b) Yarılma göçmesiyle sonuçlanan deney numunesi

3.1. Karbon FRP Sargılı Çelik Kompozit Donatılar İle Salt Karbon FRP Ve Salt Çelik Donatıların Aderans Dayanımlarının Karşılaştırılması

Yüzeyi herhangi bir deformasyon işlemine maruz bırakılmamış karbon FRP sargılı çelik donatıların aderans dayanım değerlerini, çeşitli yüzey özelliğine sahip salt karbon FRP (CFRP) donatılar ile karşılaştırabilmek için Tablo 6 kullanılmıştır. Tablo 6 literatürdeki çeşitli çalışmalarda çekip çıkarma deneylerinden derlenmiştir. Buna ilaveten Tablo 6’da donatıların ortalama aderans dayanımları verilmiştir.

Tablo 6’da da görüleceği üzere karbon FRP sargılı çelik donatıların aderans dayanımları, yüzeyine herhangi bir deformasyon işlemi uygulanmamasına rağmen düz CFRP donatıların aderans dayanımlarından yaklaşık %740 ile %867, kumlanmış, demet ve örgülü yüzeyli salt CFRP donatıların aderans dayanımlarından da yaklaşık %16 ile %310 daha yüksek bir aderans dayanımına sahiptir. Karbon FRP sargılı çelik donatıların aderans dayanımları, yüzey deformasyon işlemi nervürlü, oluklu ve sargılı olan donatılar ile kıyaslandığında ise aderans dayanımı bu donatıların %45’i ile %96’sı arasında değiştiği görülmektedir. Benzer şekilde karbon FRP sargılı çelik donatıların aderans dayanımları salt çelik donatıların aderans dayanımlarının %47’si ile %137’si arasında değişmektedir. Tüm bu karşılaştırmalara bakılarak karbon FRP sargılı çelik donatıların ortalama bir aderans dayanımına sahip olduğu sonucu çıkarılabilir. Bu nedenle bu donatılar, herhangi bir ek yüzey deformasyonu uygulamasına gerek kalmadan beton temas boylarının bir miktar artırılması halinde bile çok iyi bir aderans performansı sergileyebilecekleri düşünülmektedir.

Tablo 6. Salt karbon FRP ve salt çelik donatıların aderans dayanımları

Araştırmacı	Yüzey deformasyon türü ve donatı türü	Donatı yüzey deformasyon şekli	Φ (mm)	L (mm)	Beton basınç dayanımı (MPa)	Göçme Tipi*	$u_{ort.}$ (MPa)
Hamad vd. (2017)	Kumlanmış CFRP		10	100,00	40	C	8,33
“	Nervürlü çelik	-	10	“	“	S	11,31
Park vd. (2016)	Örgülü CFRP		12,7	51,00	30	P	10,10
“	CFRP demeti		12,5	“	“	P	4,45
“	Nervürlü çelik	-	12,7	“	“	“	17,75
Wilson vd. (2003)	Oluklu CFRP		8	88,00	65	S	18,71
“	“	“	10	“	“	S	16,36
“	“	“	12	“	“	S	14,36
“	Düz CFRP	“	-	“	“	-	1,59
“	Nervürlü çelik	-	12,7	“	“	S	23,84
Wei vd. (2019)	Sargılı CFRP		9,3	~47,00	33	P	26,00
Okelo & Yuan (2005)	Nervürlü CFRP		10	42,70	43	P	22,80
“	Nervürlü çelik	“	14	42,80	40	P	24,40
Basaran & Donmez (2020)	Nervürlü çelik	-	8,17	40,85	31	P	25,10
“	“	-	10,16	50,80	“	P	22,51
“	“	-	12,28	61,40	“	P+S	20,74






*C= Konik kopma; P= Sıyrılmama; S= Yarılmama, P+S= Aynı seri deneyler içinde iki türlü göçme

3.2. Karbon FRP Sargılı Çelik Kompozit Donatılar İle Çelik-FRP Kompozit Donatıların Aderans Gerilmelerinin Karşılaştırılması

Karbon FRP sargılı çelik donatıların aderans dayanım değerlerini, çelik-cam FRP kompozit ve çelik-bazalt FRP kompozit donatılar ile karşılaştırabilmek için Tablo 7 kullanılmıştır. Tablo 7’de literatürdeki çeşitli çalışmalarda çekip çıkarma deneylerinden derlenmiştir. Tablo 7 hazırlanırken donatıların ortalama fiziksel özelliklerinden ve aderans dayanım değerlerinden yararlanılmıştır.

Yüzeyinde herhangi bir deformasyon işlemi olmamasına rağmen karbon FRP sargılı çelik donatıların maksimum aderans dayanımları, sargılı yüzey özelliğine sahip çelik-bazalt FRP kompozit donatıların yaklaşık %76’sı ile %118’si arasında, sargılı yüzey özelliğine sahip çelik-karbon FRP kompozit donatıların ise %78’i ile %92’si arasında değişmektedir. Ancak sargılı yüzey özelliğine sahip çelik-bazalt FRP kompozit donatılara kumlama yapılmasıyla bu donatıların aderans dayanımları %34’e kadar artırılabilir. Karbon FRP sargılı çelik donatıların maksimum aderans dayanımları, kumlanmış ve nervürlü yüzeye sahip çelik-cam FRP kompozit donatıların ise %57’si ile %73’ü arasında değişmektedir. Son olarak karbon FRP sargılı çelik donatıların maksimum aderans dayanımları, yüzey deformasyon işlemi uygulanmamış çelik-cam FRP kompozit donatıların ise %104’ü ile %133’ü arasında değişmektedir.

Tablo 7. Çelik-cam FRP ve çelik-bazalt FRP kompozit donatıların aderans dayanımları

Araştırmacı	Yüzey deformasyon türü ve donatı türü	Donatı yüzey deformasyon şekli	Φ (mm)	L (mm)	Beton basınç dayanımı (MPa)	Göçme Tipi*	u_{ort} (MPa)
Ma vd. (2019)	Sargılı yüzeyli Çelik-bazalt FRP		16	80	35	P	11,63
“	Sargılı ve kumlanmış yüzeyli Çelik-bazalt FRP		16	“	“	“	15,57
Wu vd. (2012)	Sargılı yüzeyli Çelik-bazalt FRP		~14	70	-	P	15,38
“	Sargılı yüzeyli Çelik-karbon FRP	“	~13	-	-	“	15,02
Ju vd. (2017)	Kumlanmış ve nervürlü yüzeyli Çelik-cam FRP		18,9	~95	25	P+S	18,9-20,7
Basaran & Donmez (2020)	Ek yüzey deformasyon işlemi olmayan Çelik-cam FRP		11,77	58,85	30,96	P	10,37
“	“	“	13,76	68,80	“	“	10,84
“	“	“	15,88	79,40	“	P+S	13,26

*P= Sıyırılma; S= Yarıma, P+S= Aynı seri deneyler içinde iki türlü göçme

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada çeliğin korozyon sorununa karşı epoksi emdirilmiş karbon lifinin çelik donatı üzerine donatı çekme sünekliğinin artırılabilmesi için 30 derece sarılmasıyla üretilen ve yüzeyine herhangi bir deformasyon işlemi uygulanmamış kompozit donatıların beton ile aralarındaki aderans dayanımları çekip çıkarma deneyleri ile incelenmiştir. Araştırma sonucunda elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Deneylerin çoğunda (bir numune hariç) aderans boyunun kısa olmasından ötürü (5Φ) sıyırılma göçmesi gözlemlenmiştir. Ancak sıyırılma göçmesiyle sonuçlanan deneylerde donatıların yüzeyinde makro düzeyde herhangi bir deformasyon gözlenmemiştir.
- Çekip çıkarma deneylerinde donatıların betondan akma dayanımlarına ulaşmadan sıyırılmalarından dolayı donatı poisson etkisinin aderans davranışına etkisi sınırlı kalmıştır. Ancak kompozit donatılarda donatı poisson etkisinin (özellikle akma dayanımının ötesinde) aderans davranışına etkisinin incelenmesi gerekmektedir.
- Karbon FRP sargılı çelik donatılar, salt çelik donatıların en az %47'si kadar aderans dayanımına sahiptirler.
- Karbon FRP sargılı çelik donatıların aderans dayanımları kumlanmış, demet ve örgülü yüzeye sahip salt CFRP donatılara göre en az %16 daha yüksek olmasına rağmen yüzey deformasyonu nervürlü, oluklu ve sargılı olan CFRP donatılar ile kıyaslandığında aderans dayanımı bu donatıların %45'i ile %96'sı arasında değiştiği gözlemlenmiştir.
- Karbon FRP sargılı çelik donatıların aderans dayanımları yüzey deformasyonu sargılı olan diğer kompozit donatıların en az %76'sı olmasına rağmen sargıya ilaveten kumlama yapılması kompozit donatıların aderansını arttırmış ve bu oran %57'ye düşmüştür.

Tüm bu karşılaştırmalara bakılarak karbon FRP sargılı çelik donatıların ortalama bir aderans dayanımına sahip olduğu sonucu çıkarılabilir. Bu nedenle bu donatılar, herhangi bir ek yüzey deformasyonu uygulamasına gerek kalmadan beton temas boylarının bir miktar artırılması halinde bile çok iyi bir aderans performansı sergileyebilecekleri düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Amasya Üniversitesinde FMB-BAP 19-0429 nolu BAP projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Projeye vermiş olduğu destekten dolayı Amasya Üniversitesi Rektörlüğü BAP Koordinasyon Birimine teşekkür ederiz.

Referanslar

- ACI 440.1R-15, Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP)Bars. (2015). American Concrete Institute (ACI).
- ACI 440R-07, Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. (2007). American Concrete Institute (ACI).
- Aksoylu, C., Yazman, Ş., Özkılıç, Y. O., Gemi, L. & Arslan, M. H. (2020). Experimental analysis of reinforced concrete shear deficient beams with circular web openings strengthened by CFRP composite. *Composite Structures*, 249, 112561. doi:10.1016/j.compstruct.2020.112561
- Basaran, B. & Donmez, E. T. (2020). Investigation of Bond Strength Between GFRP Wrapped Steel Reinforcement and Concrete with Pullout Test. *Hittite Journal of Science & Engineering*, 7(4), 321–327. doi:10.17350/HJSE19030000201
- Basaran, B. & Kalkan, I. (2020). Investigation on variables affecting bond strength between FRP reinforcing bar and concrete by modified hinged beam tests. *Composite Structures*, 242(March), 112185. doi:10.1016/j.compstruct.2020.112185
- Cheung, M. M. S. & Tsang, T. K. C. (2010). Behaviour of Concrete Beams Reinforced with Hybrid FRP Composite Rebar. *Advances in Structural Engineering*, 13(1), 81–93. doi:10.1260/1369-4332.13.1.81
- Design Manual No.3 Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers. (2007). ISIS Canada Research Network.
- EN 12390-2:2009, Testing hardened concrete-Part 2: Making and curing specimens for strength tests. (2009). European Committee For Standardization.
- EN 12390-3:2009, Testing hardened concrete-Part 3: Compressive strength of test specimens. (2009). European Committee For Standardization.
- Gemi, L., Aksoylu, C., Yazman, Ş., Özkılıç, Y. O. & Arslan, M. H. (2019). Experimental investigation of shear capacity and damage analysis of thinned end prefabricated concrete purlins strengthened by CFRP composite. *Composite Structures*, 229, 111399. doi:10.1016/j.compstruct.2019.111399
- Hamad, R. J. A., Megat Johari, M. A. & Haddad, R. H. (2017). Mechanical properties and bond characteristics of different fiber reinforced polymer rebars at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 142, 521–535. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.113
- Ju, M., Park, G., Lee, S. & Park, C. (2017). Bond performance of GFRP and deformed steel hybrid bar with sand coating to concrete. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 36(6), 464–475. doi:10.1177/0731684416684209
- Kartal, S. (2020). Lifli polimer donatı oranının hibrit FRP-çelik donatılı beton kirişlerin eğilme davranışı üzerindeki etkileri. Doktora Tezi. Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.
- Lin, X. & Zhang, Y. X. (2013). Bond–slip behaviour of FRP-reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 44, 110–117. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.03.023
- Ma, G., Huang, Y., Aslani, F. & Kim, T. (2019). Tensile and bonding behaviours of hybridized BFRP–steel bars as concrete reinforcement. *Construction and Building Materials*, 201, 62–71. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.196
- Madenci, E., Özkılıç, Y. O. & Gemi, L. (2020a). Theoretical investigation on static analysis of pultruded GFRP composite beams. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 8(3), 483-490. doi:10.21541/apjes.734770
- Madenci, E., Özkılıç, Y. O. & Gemi, L. (2020b). Experimental and theoretical investigation on flexure performance of pultruded GFRP composite beams with damage analyses. *Composite Structures*, 242, 112162. doi:10.1016/j.compstruct.2020.112162
- Okelo, R. & Yuan, R. L. (2005). Bond Strength of Fiber Reinforced Polymer Rebars in Normal Strength Concrete. *Journal of Composites for Construction*, 9(3), 203–213. doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(2005)9:3(203)
- Park, J.-S., Lim, A.-R., Kim, J. & Lee, J.-Y. (2016). Bond performance of fiber reinforced polymer rebars in different casting positions. *Polymer Composites*, 37(7), 2098–2108. doi:10.1002/pc.23388

- Seo, D.-W., Park, K.-T., You, Y.-J. & Lee, S.-Y. (2016). Experimental Investigation for Tensile Performance of GFRP-Steel Hybridized Rebar. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 1–12. doi:10.1155/2016/9401427
- Soric, Z., Kisicek, T. & Galic, J. (2010). Deflections of concrete beams reinforced with FRP bars. *Materials and Structures*, 43(S1), 73–90. doi:10.1617/s11527-010-9600-1
- TS 802, Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları. (2016). Türk Standartları Enstitüsü.
- Wang, L., Shen, N., Zhang, M., Fu, F. & Qian, K. (2020). Bond performance of Steel-CFRP bar reinforced coral concrete beams. *Construction and Building Materials*, 245, 118456. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118456
- Wei, W., Liu, F., Xiong, Z., Lu, Z. & Li, L. (2019). Bond performance between fibre-reinforced polymer bars and concrete under pull-out tests. *Construction and Building Materials*, 227, 116803. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.116803
- Wilson, A. F., Tsiatas, G., Taggart, D. G., Nair, A. U. & Kim, T. J. (2003). Investigation of CFRP Reinforced Concrete Interfacial Load Transfer. *Proceedings of the TRB 2003 Annual Meeting*.
- Wisnom, M. R. (2016). Mechanisms to create high performance pseudo-ductile composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 139(1). doi:10.1088/1757-899X/139/1/012010
- Wu, G., Sun, Z. Y., Wu, Z. S. & Luo, Y. B. (2012). Mechanical Properties of Steel-FRP Composite Bars (SFCBs) and Performance of SFCB Reinforced Concrete Structures. *Advances in Structural Engineering*, 15(4), 625–635. doi:10.1260/1369-4332.15.4.625
- Yan, F., Lin, Z. & Yang, M. (2016). Bond mechanism and bond strength of GFRP bars to concrete: A review. *Composites Part B: Engineering*, 98, 56–69. doi:10.1016/j.compositesb.2016.04.068



Dielectric Properties of BN-ZnO-GNP Doped PU-EG Composites

Safa Polat 

Karabük University, Material Research and Development Centre, 78050, Karabük, TURKEY

Başyuru/Received: 15/03/2021

Kabul / Accepted: 19/05/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 02/06/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Abstract

In this study, ZnO and GNP were added separately and together to improve the dielectric constant values of hexagonal boron nitride. Polyurethane (PU) and ethylene glycol (EG) were used as binders. The productions were carried out by dispersing each additive separately in acetone and then coating it with the doctor blade method on aluminium foil. The characterizations were carried out with FTIR, XRD and SEM. Then, the capacitance values of each composite were first measured with the LCR meter and then the dielectric constant were calculated. According to the results, the highest dielectric constant values were obtained at the 100 and 120 Hz frequencies. At the frequency value of 100 kHz, the lowest dielectric constant was obtained in all composites. Compared to pure BN, an increase of 115% was achieved with ZnO doping, while an increase of up to 145% was achieved with GNP doping. The highest increase was achieved up to 160% with ZnO + GNP doping. In addition, with the doping of ZnO + GNP, the amount of decrease at high frequencies was less than the others. This is thought to be due to the combined effect of both ZnO and GNP, which has a large surface area.

Key Words

“Graphene nanoplate, Zinc oxide, Boron nitride, Dielectric constant, Composite materials”

1. Introduction

With the increase of the human population and the depletion of natural resources, the demand for the clean energy sector has increased. Especially with the decrease in fossil and solid fuels, the use of electrical energy has gained importance in many areas (Strengers, 2013). One of these areas is the automotive sector (Bayod-Rújula et al., 2011). In recent years, it is aimed to significantly reduce the use of fossil fuels and environmental pollution in the world with the development of electric cars in this sector (Cusenza et al., 2019). For this purpose, many studies have been conducted in the scientific world on the storage of electrical energy to be used in such applications (Muratori, 2018). One of these studies is capacitors. Capacitors are systems where electricity is stored by accumulating charge on a dielectric material placed between two metal plates. In this system, polarization is created by applying an electric field to the dielectric material during charging. These polarizations create an electric current while returning to its former state (discharge) (Sun et al., 2014; Zhang, 2020). The materials developed based on this working principle have been put into use for the purpose of electrical energy storage especially for portable vehicles in recent years. One of the most important parameters affecting the storage capacity in such systems is known as the thickness of the dielectric material placed between two plates (Black and Welsler, 1999). In order to reduce this thickness, various coatings consisting of different components have been applied to metal plate surfaces by using methods such as spin coating and deep coating (Dyer et al., 2010; Shin et al., 2007). However, such capacitors are known to be both low capacity and costly in the manufacturing process. In this context, the use of nanoparticle reinforced composites produced by simpler methods as dielectric material in capacitors has become widespread in recent years (Chan et al., 2019; Deshmukh et al., 2016; Wang et al., 2018). Especially, the thickness of the dielectric material and the surface area of the collectors are very important. In this context, the use of plate-shaped microparticles such as hexagonal boron nitride in capacitors enables the formation of micro-sized cells and thus higher capacitance values. However, although boron nitride has a geometric advantage, its dielectric coefficient is quite low. In this context, higher energy storage can be achieved by increasing the dielectric and capacitance values. In addition, thanks to semiconductors such as SiO₂ CuO, BaTiO₃ and SrTiO₃ the load storage capacity can be improved by increasing the dielectric coefficient of such materials (Akinay and Akkuş, 2020, 2019; Wang et al., 2020). However, since there is a need for more energy storage in recent years, it is desired that such ceramics have higher electrical storage capacities. It is known that products developed with nano technology, which are innovative and provide more efficiency compared to products developed with traditional productions, provide very beneficial results in this field. It is observed that the development of large surface area nanoparticles such as carbon nanotube and graphene and their use together with dielectric materials significantly increase the capacitance values of ceramics (Deng et al., 2013). In addition, it is known that metal-based nanoparticles are also used in capacitors by adding dielectric material to increase capacitance (Lu et al., 2006).

Considering these results, it was aimed to add graphene and zinc oxide particles on hexagonal boron nitride particles, which have a plate-like microstructure. For this purpose, the effect of graphene in the form of a plate and ZnO, a semiconductor metal oxide, on capacitance and dielectric coefficient were examined separately and together. Ethylene glycol (EG) and polyurethane (PU) are used as binders in production. The characterizations of the products obtained were made with FTIR and SEM. After these processes, the capacitance values of each product were measured at five different frequencies using the LCR meter. Then, the dielectric coefficients of each are calculated and the results are discussed.

2. Materials and Method

Hexagonal boron nitride (hBN, 10 µm), graphene nano plates (GNPs, 5 µm, thickness of 5-8 nm and a surface area of 750 m²/g), ZnO, acetone, polyurethane and ethylene glycol were utilized as raw materials without further purification. Boron nitride was purchased from HENZE BNP. Other materials, especially graphene, were purchased from Nanografi Nano Technology Inc.

In this study, firstly, four different containers were taken and numbered from 1 to 4. Then 0.35 g of h-BN was added to the first container. 0.315 g h-BN and 0.035 g ZnO were added to the second container. 0.315 g h-BN and 0.035 g GNP were added to the third container. 0.315 g h-BN, 0.0175 g ZnO and 0.0175 g GNP were added to the fourth container. Each of these containers was added 10 ml of acetone, covered with parafilm, and mixed in an ultrasonic bath for one hour (Fig. 1a). After this process, each was taken on a magnetic stirrer and 3 ml of polyurethane and 3 ml of ethylene glycol were added as binders and the acetone was removed by stirring at approximately 80-120 °C for a further period (Fig. 1b). The pasty mixtures obtained were placed on aluminum foil with the help of a spatula. Then, the mixture dough was covered with the doctor blade method on the foils [1]. In this method, briefly, firstly, binder polymers, solvent and powder mixtures are combined in a container in determined proportions and mixed until a homogeneous slurry is obtained. Then, the aluminum foil is cut in the specified size and adhered to a hard and smooth surface and the surface is cleaned with alcohol and acetone. Then, one end of the area to be covered is adhered with tape so that it remains open. After this process, the prepared mud is put on the foil and a knife or stick is pressed on it and moved towards the open end. Thus, coating is performed on the foil surface. After applying the same method for each, the foils were dried in a 70 °C oven for one day. After this process, each was cut separately in suitable dimensions. The foils on the underside of the cut plates serve as conductor collectors. Conductivity was ensured by sticking a conductive carbon tape on the upper sides as shown in Fig. 1c. Capacitance measurements were made by attaching one of the alligator copper cables coming from the LCR meter to foil and the other to the carbon tape. Measurements were carried out at frequencies of 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz, and 100 kHz. After this process, the dielectric coefficient of each composite was calculated according to the formula given in equation 1 (Rao et al., 2002).

$$C = (\epsilon_0 \epsilon_r) A / t$$

Where ϵ_0 is the dielectric constant of the free space (8.854×10^{-12} F/m), ϵ_r , A and t are the dielectric constant, area and thickness of the composite materials, respectively.

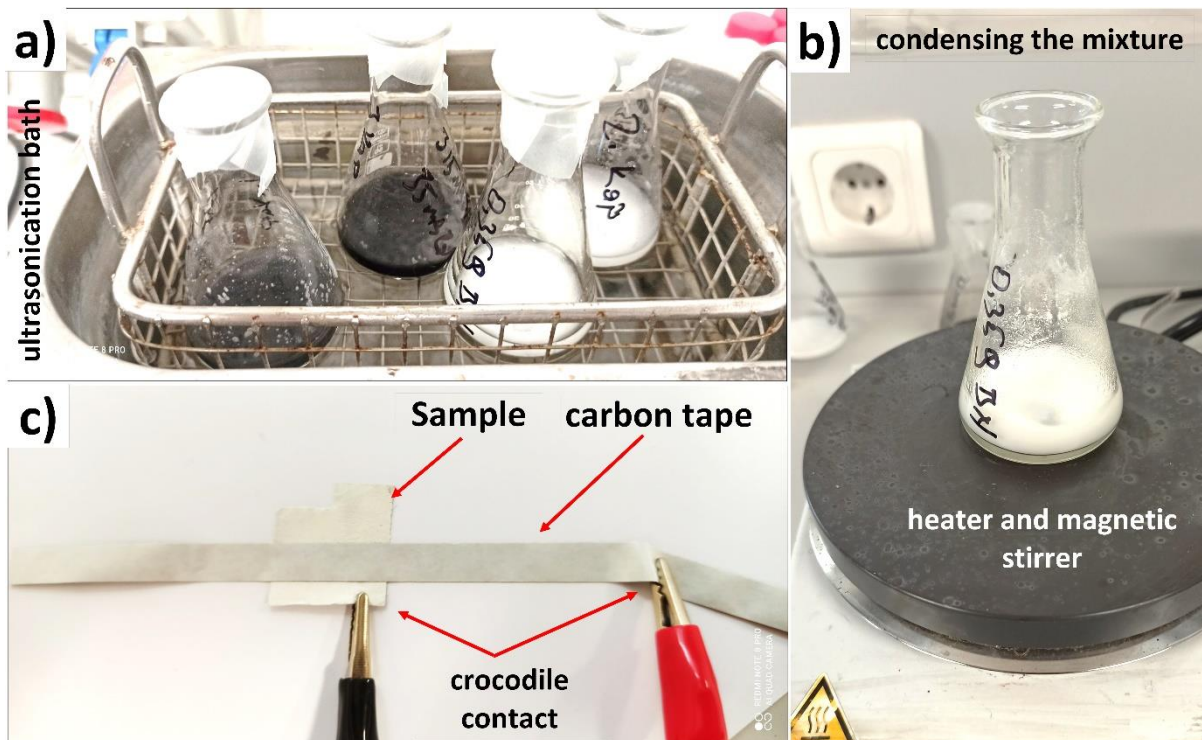


Figure 1. Experimental setups of production and measurements. (a) Ultrasonication process of powder particles. (b) Concentration of the mixtures by heating in a magnetic stirrer. (c) Measurement with LCR meter.

3. Results and Discussion

FTIR analysis was first performed for the characterization of composites. The obtained results are given in Fig. 2 and 3. Fig. 2 shows the spectra of the raw materials used for composites. When the spectrum of the powder particles is evaluated, it is understood that the sharp and flat peaks at 768 cm^{-1} and 1363 cm^{-1} belong to the boron and nitrogen bond (Kong et al., 2019). The peaks observed at 492 cm^{-1} and 560 cm^{-1} correspond to the bond between zinc and oxygen (Handore et al., 2014). The unclear peak observed around 1530 cm^{-1} belongs to the carbon-carbon bond from graphene (Peng et al., 2013). The other two spectrums are the characteristic peaks of ethylene glycol (Nohra et al., 2016) and polyurethane (Caddeo et al., 2015) raw materials. These include the OH bond at approximately 3300 cm^{-1} and the CH bonds at 2870 and 2942 cm^{-1} . Other characteristic peaks belong to the C = O bond in 1730 , 1016 and 1088 cm^{-1} . Apart from these, it belongs to the C-O-C, N-H and C-N bonds observed in 1066 , 1228 , 1458 and 1530 cm^{-1} , respectively. When looking at the peaks obtained from composites in the light of these data, the sharp peak at 768 cm^{-1} and the broad peaks observed in 1363 cm^{-1} belong to the B-N bond. This situation confirms that boron nitride is used in composites. On the other hand, the peaks of ZnO observed at 492 and 560 cm^{-1} of BN + ZnO composites confirm the use of zinc oxide in this composite. However, the ZnO peak in the BN + ZnO + GNP composite is observed at a very low intensity, which is due to the lower amount of ZnO in it. Carbon bonds for graphene-containing composites could not be distinguished due to the carbon bond in ethylene glycol and polyurethane. Verification of this is discussed in the microstructure images.

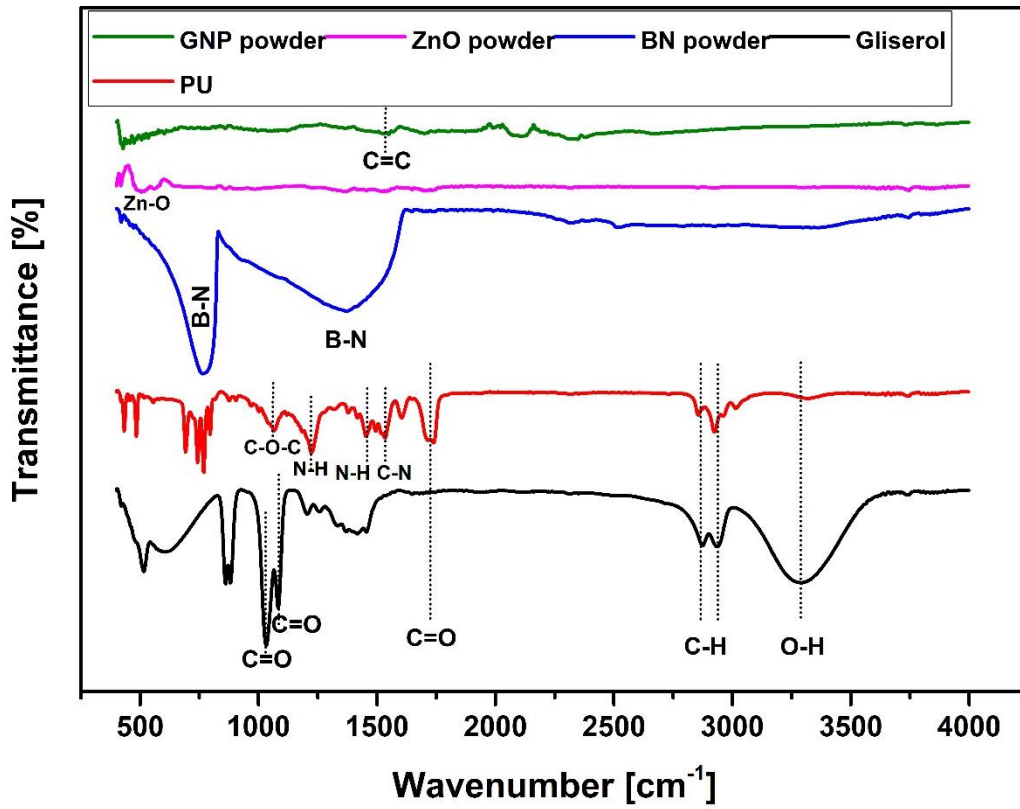


Figure 2. FTIR spectra of raw materials

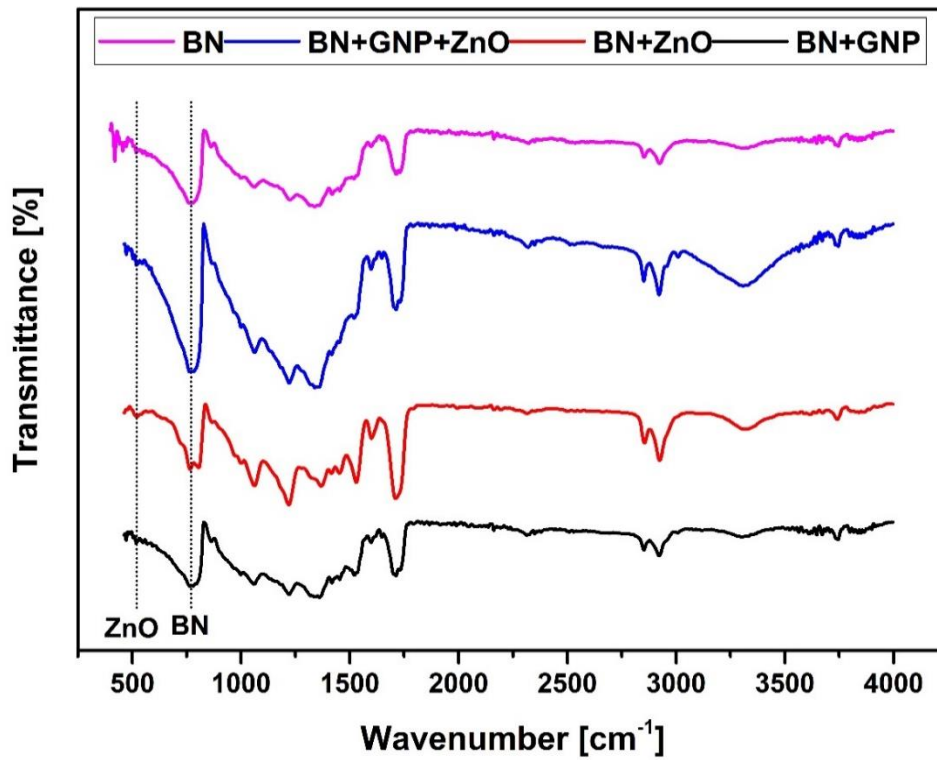


Figure 3. FTIR spectra of composite materials

XRD analysis results of powder mixtures are given in figure 4. According to the results of this analysis, it is understood that the sharp peaks observed at 2θ value approximately 31° , 34° and 36° belong to the planes (100), (002) and (101) of ZnO, respectively. Also, low intensity peaks observed at approximately 47° , 56° , 62° , 66° , 67° and 68° belong to the (102), (110), (103), (200), (112) and (201) planes of ZnO, respectively (Zak et al., 2011). Apart from these, the severe peak observed at about 26° belongs to the hexagonal structure BN and GNP (Niftaliyeva et al., 2018; Zak et al., 2011). These two peaks coincide because the structures and planes of both are the same. However, the peaks of ZnO are quite distinct. Therefore, unlike the others, peaks of ZnO were observed in powder mixtures with ZnO additive. As a result, the observation of the characteristic peaks of the powder mixtures shows the accuracy of the components used. Since no extra new peak formation was observed, it can be said that no reaction took place during the mixing process.

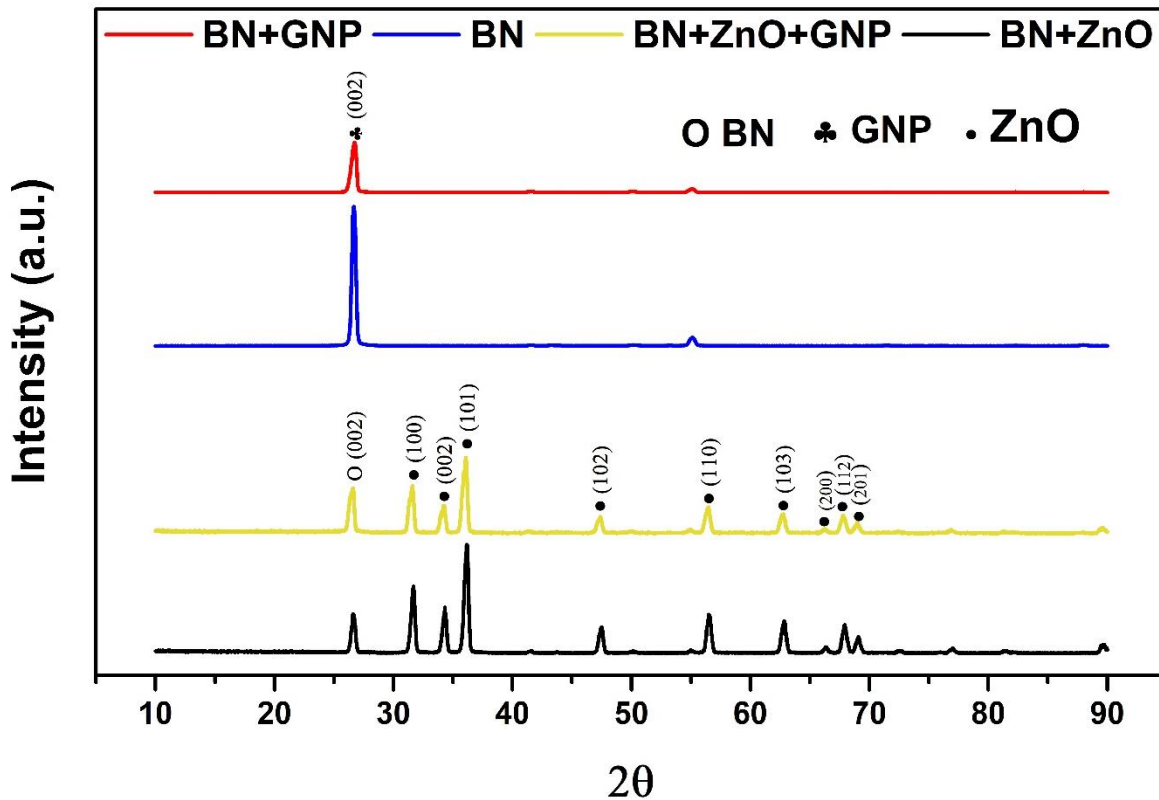


Figure 4. XRD pattern of powder mixtures

SEM images of powder particle mixtures are given in Figure 5. The surface images of boron nitride particles without any doping are given in Figure 5a. It is clear from this image that the BN surface is quite smooth and in the form of a plate. In Figure 5b, images of the ZnO-doped BN samples are given. From these images, it is understood that the ZnO particles are almost nano-sized rod-shaped, but they cluster due to electrostatic interaction and precipitate on the BN surfaces. In Figure 5c, BNs doped with nano-sized graphene plates are observed. Since GNP and BNs have the same microstructure image, it is very difficult to distinguish both structures from each other. However, here an image of nano-thick graphene plates intertwined with BN particles was obtained. Based on these images, it can be said that the interaction of GNP and BN has occurred quite well. On the other hand, in figure 5d, the picture of the mixture of BN + ZnO + GNP is given. In this image, it is observed that almost nano-sized rod-shaped ZnO are scattered between BN plates together with GNP. It is understood that these ZnO rods are formed by adding a nano-sized component to the mixture. The reason for this is thought to be that the nano-sized graphene plates were separated by penetrating between the clumped ZnO rods (Bayod-Rújula et al., 2011). In this way, it is observed that all three structures interact more with each other. On the other hand, the microstructure image of the composites obtained by mixing these micro and nanoparticles with polyurethane and ethylene glycol and spreading on aluminum foil is given in figures 6a and b. The image here shows that the particles are homogeneously distributed in the polymer, but porosity is also included. Two of the most important reasons for the occurrence of such porosities are viscosity and the other is shrinkage in the polymer during drying (Krokida et al., 1998; Schulze et al., 2003). As the amount of particles reinforced into the polymer increases, the viscosity also increases and therefore it solidifies rapidly without filling all the spaces during shaping. In addition, during the solidification by drying, some volumetric shrinkage occurs in the polymer and this causes the formation of voids in the structure. On the other hand, the low amount of binder compared to supplements is thought to have caused such porosities. However, it is found successful because it enables the particles to be found in bulk.

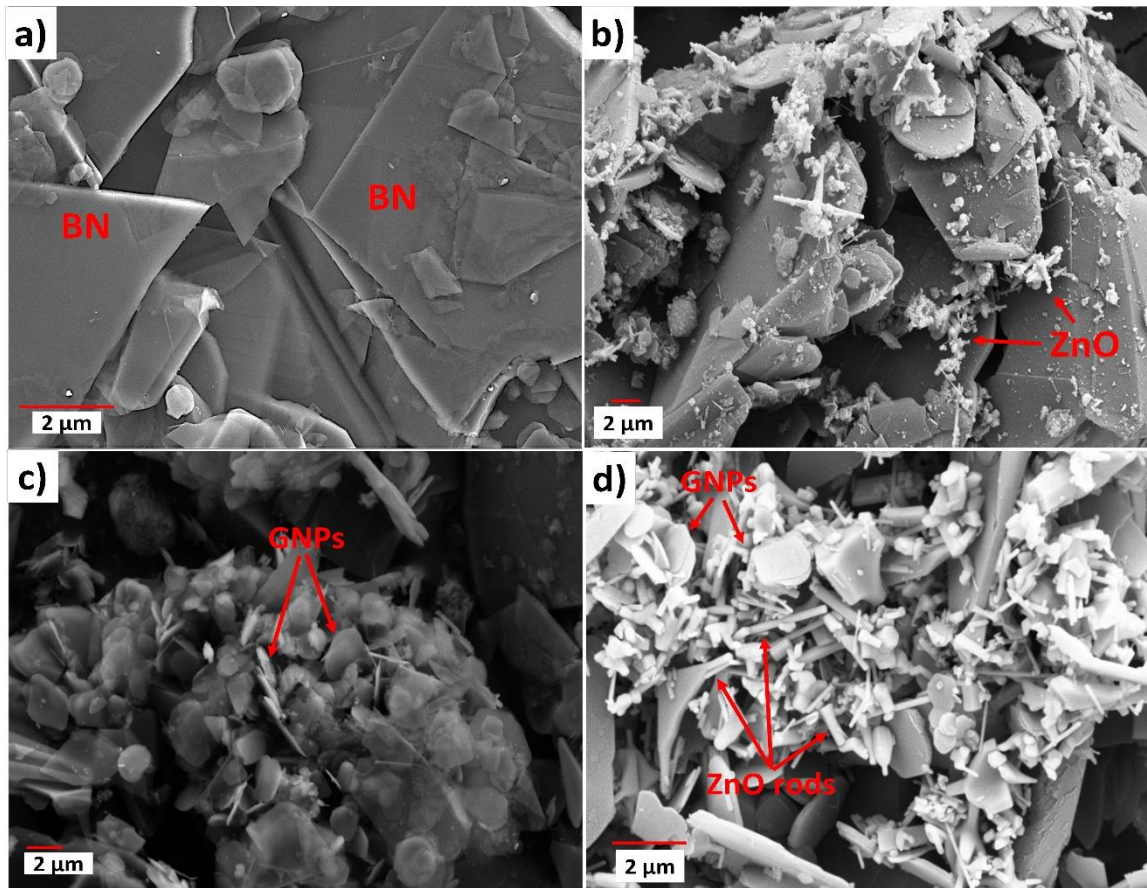


Figure 5. SEM images of powders. (a) BN. (b) BN + ZnO. (c) BN + GNP. (d) BN + ZnO + GNP. (k and l) Composite of BN + ZnO + GNP

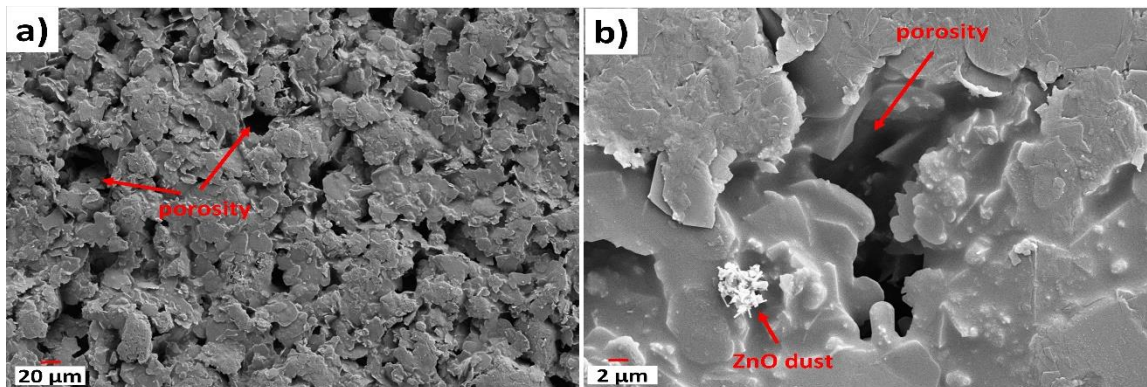


Figure 6. (a and b) Images of polyurethane + BN + ZnO + GNP composites at different magnifications

As for the dielectric and capacitance values of composites, each is given in table 1 in detail. According to these results, the graph created with the dielectric coefficient values against the frequency change of each composite is given in Fig. 7. According to these results, the highest dielectric coefficient for all composites is at 100 Hz, which is the lowest frequency. Among them, pure BN-doped composites are approximately 2.2, BN + ZnO-doped has 4.75, BN + GNP-doped has 5.4, and BN + ZnO + GNP-doped is 5.65. When compared with pure BN, it is calculated that there is 115% increase with ZnO doping, 145% increase with GNP doping and 156% increase with ZnO + GNP doping. When the frequency was increased to 120 Hz, the increase in percentage was calculated to be almost the same. However, when the frequency was increased to 1 kHz, there was an increase of 64% with ZnO doping, 120% with GNP doping and 160% with ZnO + GNP doping compared to pure BN. When the frequency was at 10 kHz, the doping of ZnO reached 4%, GNP doping reached 40% and ZnO + GNP doping reached 193%. Similarly, at 100 kHz, it increased 3% with ZnO, 9% with GNP and 147% with ZnO + GNP compared to BN. According to these results, as the frequency value increased, the dielectric coefficient values

of all composites decreased significantly, especially after 1 kHz. Although the dielectric coefficient is increased at low frequencies compared to BN with ZnO doping, it is in very low amounts at high frequencies. The GNP doping increased the dielectric coefficient significantly more than ZnO, especially up to 10 kHz. Apart from these, there is an exception that the percentage increase does not decrease as the frequency increases, which is the combined doping of ZnO + GNP. Although the doping of these components together decreases due to the frequency increase, it is quite high compared to pure BN. In this context, it can be said that the most successful results are with doping of ZnO + GNP. It can be said that the second most successful was the GNP doping and the last was ZnO. ZnO is thought to increase the values of BNs due to the height in its dielectric coefficient. GNP, on the other hand, is thought to contribute by creating nano-cells in series and parallel between BN plates, as it is conductive plates and spread over a large surface area. When ZnO particles with higher dielectric coefficient compared to BN were added between these plates, a synergistic effect was created, and higher dielectric coefficient results were obtained than all combinations.

When it comes to the comparison of the results with the literature, in this context, Çıracı et al. carried out a similar study and their results are quite consistent with our findings (Cusenza et al., 2019). In another study, the change in capacitance depending on the frequency was examined and according to the results it was found that the capacitance value at low frequencies was higher. It has been said that the reason for this is that at low frequency, the net polarization of the material increases because the electrons jump more easily, and this causes an increase in capacitance. However, at higher frequencies, it has been stated that the relaxation time of the charge carrier is not as fast as the change of the electric field with time, which has been reported to cause a decrease in capacitance (Muratori, 2018; Zhang, 2020). In this study, it is thought that a similar situation exists because the highest capacitance values are obtained at low frequencies.

Table 1 Sample parameters, measurement, and calculation results (C, ϵ_0 , ϵ_r , A, t = the capacitance, dielectric constant of free space, dielectric constant, area and thickness of the composite materials, respectively).

BN					
	100Hz	120Hz	1kHz	10kHz	100kHz
C	7.30E-11	7.20E-11	6.50E-11	3.00E-11	2.30E-11
ϵ_0	8.85E-12	8.85E-12	8.85E-12	8.85E-12	8.85E-12
ϵ_r	2.21E+00	2.18E+00	1.96E+00	9.06E-01	6.95E-01
A	0.000486	0.000486	0.000486	0.000486	0.000486
t	0.00013	0.00013	0.00013	0.00013	0.00013
BN + ZnO					
	100Hz	120Hz	1kHz	10kHz	100kHz
C	1.46E-10	1.42E-10	9.90E-11	2.90E-11	2.20E-11
ϵ_0	8.85E-12	8.85E-12	8.85E-12	8.85E-12	8.85E-12
ϵ_r	4.75E+00	4.62E+00	3.22E+00	9.44E-01	7.16E-01
A	0.000486	0.000486	0.000486	0.000486	0.000486
t	0.00014	0.00014	0.00014	0.00014	0.00014
BN + GNP					
	100Hz	120Hz	1kHz	10kHz	100kHz
C	5.20E-11	5.20E-11	5.00E-11	4.74E-11	4.35E-11
ϵ_0	8.85E-12	8.85E-12	8.85E-12	8.85E-12	8.85E-12
ϵ_r	6.23E+00	6.23E+00	5.99E+00	5.67E+00	5.21E+00
A	0.000066	0.000066	0.000066	0.000066	0.000066
t	0.00007	0.00007	0.00007	0.00007	0.00007
BN + GNP + ZnO					
	100Hz	120Hz	1kHz	10kHz	100kHz
C	7.90E-11	7.60E-11	7.20E-11	3.70E-11	2.40E-11
ϵ_0	8.85E-12	8.85E-12	8.85E-12	8.85E-12	8.85E-12
ϵ_r	5.65E+00	5.44E+00	5.15E+00	2.65E+00	1.72E+00
A	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
t	0.00019	0.00019	0.00019	0.00019	0.00019

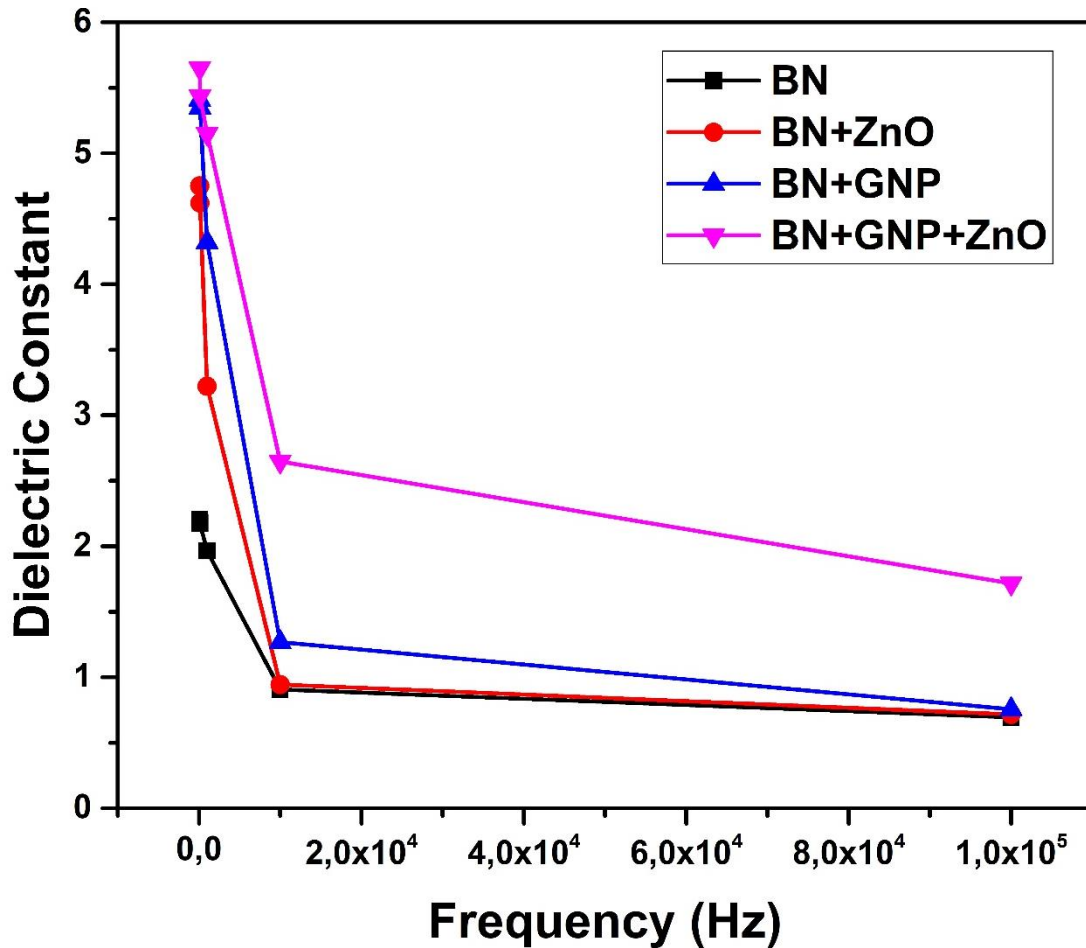


Figure 7. Plot of change in dielectric constant with frequency

4. Conclusion

According to the results obtained, the production of hexagonal boron nitride plates with ZnO and GNP additives with polyurethane and ethylene glycol binders has been successfully carried out. All of the materials used as raw materials and made into composite in characterizations with FTIR have been successfully verified. The combination states of these materials are shown in detail in the microstructure images. In the dielectric coefficient results, it was observed that all dopings increased around 115% to 160% at low frequencies, while this increase decreased in others except ZnO + GNP as the frequency increased. As a result, when ZnO and GNP are evaluated separately, it is understood that GNP is superior, but ZnO + GNP is the most successful composition. It is concluded that this is due to the synergistic effect of ZnO, which is located between GNP nanoplates and has a higher dielectric coefficient value than BN.

References

- Akinay, Y., Akkuş, I.N., 2020. Synthesis and characterization of the pearlescent pigments based on mica deposited with SiO₂, AlN and TiO₂: First report of its dielectric properties. *Ceramics International* 46, 17735–17740.
- Akinay, Y., Akkuş, I.N., 2019. The optic and dielectric properties of CuO deposited barite pigments. *Academic Perspective Procedia* 2, 1325–1330.
- Bayod-Rújula, Á.A., Lorente-Lafuente, A.M., Cirez-Oto, F., 2011. Environmental assessment of grid connected photovoltaic plants with 2-axis tracking versus fixed modules systems. *Energy* 36, 3148–3158.
- Black, C.T., Welser, J.J., 1999. Electric-field penetration into metals: consequences for high-dielectric-constant capacitors. *IEEE Transactions on Electron Devices* 46, 776–780.

- Caddeo, S., Baino, F., Ferreira, A.M., Sartori, S., Novajra, G., Ciardelli, G., Vitale-Brovarone, C., 2015. Collagen/Polyurethane-Coated Bioactive Glass: Early Achievements towards the Modelling of Healthy and Osteoporotic Bone. *Key Engineering Materials* 631, 184–189. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.631.184>
- Chan, K.-Y., Yang, D., Demir, B., Mouritz, A.P., Lin, H., Jia, B., Lau, K.-T., 2019. Boosting the electrical and mechanical properties of structural dielectric capacitor composites via gold nanoparticle doping. *Composites Part B: Engineering* 178, 107480.
- Cusenza, M.A., Guarino, F., Longo, S., Mistretta, M., Cellura, M., 2019. Reuse of electric vehicle batteries in buildings: An integrated load match analysis and life cycle assessment approach. *Energy and Buildings* 186, 339–354.
- Deng, L., Hao, Z., Wang, J., Zhu, G., Kang, L., Liu, Z.-H., Yang, Z., Wang, Z., 2013. Preparation and capacitance of graphene/multiwall carbon nanotubes/MnO₂ hybrid material for high-performance asymmetrical electrochemical capacitor. *Electrochimica Acta* 89, 191–198.
- Deshmukh, K., Ahamed, M.B., Deshmukh, R.R., Pasha, S.K., Chidambaram, K., Sadasivuni, K.K., Ponnamma, D., AlMaadeed, M.A.-A., 2016. Eco-friendly synthesis of graphene oxide reinforced hydroxypropyl methylcellulose/polyvinyl alcohol blend nanocomposites filled with zinc oxide nanoparticles for high-k capacitor applications. *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 55, 1240–1253.
- Dyer, T.W., Cartier, E.A., Chudzik, M.P., Moumen, N., 2010. Deep trench (DT) metal-insulator-metal (MIM) capacitor.
- Handore, K., Bhavsar, S., Horne, A., Chhattise, P., Mohite, K., Ambekar, J., Pande, N., Chabukswar, V., 2014. Novel Green Route of Synthesis of ZnO Nanoparticles by Using Natural Biodegradable Polymer and Its Application as a Catalyst for Oxidation of Aldehydes. *Journal of Macromolecular Science, Part A* 51, 941–947. <https://doi.org/10.1080/10601325.2014.967078>
- Kong, D., Zhang, D., Guo, H., Zhao, J., Wang, Z., Hu, H., Xu, J., Fu, C., 2019. Functionalized Boron Nitride Nanosheets/Poly(L-lactide) Nanocomposites and Their Crystallization Behavior. *Polymers* 11, 440. <https://doi.org/10.3390/polym11030440>
- Krokida, M.K., Karathanos, V.T., Maroulis, Z.B., 1998. Effect of freeze-drying conditions on shrinkage and porosity of dehydrated agricultural products. *Journal of food engineering* 35, 369–380.
- Lu, J., Moon, K.-S., Xu, J., Wong, C.P., 2006. Synthesis and dielectric properties of novel high-K polymer composites containing in-situ formed silver nanoparticles for embedded capacitor applications. *Journal of Materials Chemistry* 16, 1543–1548.
- Muratori, M., 2018. Impact of uncoordinated plug-in electric vehicle charging on residential power demand. *Nature Energy* 3, 193–201.
- Niftaliyeva, A., Pehlivan, E., Polat, S., Avci, A., 2018. Chemical synthesis of single-layer graphene by using ball milling compared with NaBH₄ and hydroquinone reductants. *Micro & Nano Letters* 13, 1412–1416.
- Nohra, B., Candy, L., Blanco, J.-F., Raoul, Y., Mouloungui, Z., 2016. Synthesis of High-Molecular-Weight Multifunctional Glycerol Polyhydroxyurethanes PHUs. *Molecules* 21, 1220. <https://doi.org/10.3390/molecules21091220>
- Peng, X., Li, Y., Zhang, G., Zhang, F., Fan, X., 2013. Functionalization of Graphene with Nitrile Groups by Cycloaddition of Tetracyanoethylene Oxide. *Journal of Nanomaterials* 2013, e841789. <https://doi.org/10.1155/2013/841789>
- Rao, Y., Ogitani, S., Kohl, P., Wong, C.P., 2002. Novel polymer–ceramic nanocomposite based on high dielectric constant epoxy formula for embedded capacitor application. *Journal of Applied Polymer Science* 83, 1084–1090.
- Schulze, K.A., Zaman, A.A., Söderholm, K.-J.M., 2003. Effect of filler fraction on strength, viscosity and porosity of experimental compomer materials. *Journal of dentistry* 31, 373–382.
- Shin, H.S., Ra, S.H., Kim, Y.S., Kim, H.H., Choo, H.S., Lee, J.W., 2007. Method of manufacturing multilayered ceramic capacitor by spin coating and multilayered ceramic capacitor.
- Strengers, Y., 2013. Peak electricity demand and social practice theories: Reframing the role of change agents in the energy sector, in: *The Global Challenge of Encouraging Sustainable Living*. Edward Elgar Publishing.

Sun, Z., Li, Y.H., Wang, P., Li, Z.X., Luo, Y.J., Qu, P., 2014. Parameter design principle of the capacitors and inductors in the power electronic transformer based on MMC, in: 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, pp. 2445–2448.

Wang, Z., Li, H., Hu, H., Fan, Y., Fan, R., Li, B., Zhang, J., Liu, H., Fan, J., Hou, H., 2020. Direct observation of stable negative capacitance in SrTiO₃@ BaTiO₃ heterostructure. *Advanced Electronic Materials* 6, 1901005.

Wang, Z., Zhou, W., Sui, X., Dong, L., Cai, H., Zuo, J., Liu, X., Chen, Q., 2018. Dielectric studies of Al nanoparticle reinforced epoxy resin composites. *Polymer Composites* 39, 887–894.

Zak, A.K., Razali, R., Majid, W.A., Darroudi, M., 2011. Synthesis and characterization of a narrow size distribution of zinc oxide nanoparticles. *IJN* 6, 1399–1403. <https://doi.org/10.2147/IJN.S19693>

Zhang, S.S., 2020. Dual-Carbon Lithium-Ion Capacitors: Principle, Materials, and Technologies. *Batteries & Supercaps*.



Aktif Karbon Katkılı Kumaş/Gümüş Nanopartikül Kompozitin Hazırlanması

Preparation of Silver Nanoparticle/Activated Carbon-Reinforced Fabric Composite

Şule Ocak Araz¹ , Hüseyin Kaya² 

¹Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Metalurji-Malzeme Mühendisliği, 71100, Kırıkkale, TÜRKİYE

²Türk Silahlı Kuvvetleri, MİGYEM Müdürlüğü, 71100, Yahşihan, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 07/04/2021

Kabul / Accepted: 29/05/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 18/06/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Aktif karbon (AC), yüksek yüzey alanı ve gözenekleri sayesinde sıvı ve gaz fazdaki organik ve inorganik maddeleri adsorplama kapasitesi yüksek bir malzemedir. Aktif karbon, savunma sanayinde koruyucu giysi yapımında, silah sanayisinde patlayıcı yapımında ve elektronik sistemleri susturmak için bomba yapımında, gazların ve sıvıların saflaştırılması, arıtılmasında ve sağlık sektörü gibi birçok alanda aktif karbon kullanılır. Bu çalışmada, aktif karbon katkılı kumaşa antimikrobiyal özelliğe sahip Gümüş nanopartiküllerin (AgNP) takviye edilmesi farklı yöntem ve parametrelerinin belirlenerek AC kullanım alanlarının daha da genişletilmesi amaçlanmıştır.

Sulu çözeltide kolloidal olarak oluşan AgNP, Gümüş Nitrat'ın (AgNO₃) Sodyum Bor hidrür (NaBH₄) ile kimyasal olarak indirgenmesiyle elde edildi. Sentezlenen AgNP'lerin yapı ve özellikleri UV-VIS spektrofotometresi ve Zeta Potansiyel yöntemleri ile aydınlatıldı. Daha sonra elde edilen AgNP ile Aktif Karbon (AC) katkılı kumaş ultrasonik banyo, manyetik karıştırıcı ve çözelti içinde bekletme gibi farklı yöntemler kullanılarak kumaş üzerine adsorpsiyon yöntemi ile takviye edilmesinde etkin yöntem belirlendi. AgNP/AC katkılı kumaş numunelerinin yüzey yapı analizi Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile, yüzeye adsorplanmış gümüş nanopartiküllerin miktarı ise ICP-OES ile belirlendi. Elde edilen verilere göre AC'li kumaşın ultrasonik banyo içerisinde 1 saat bekletilmesiyle AgNP adsorplanması en uygun yöntem olduğu belirlendi.

Anahtar Kelimeler

"Gümüş Nanopartikül, Aktif Karbon, Adsorplama"

Abstract

Activated carbon is a materials with high capacity to adsorp organic and inorganic substances in liquid and gaseous phases thanks to its high surface area and pores. In the defense industry, activated carbon is used as protective clothing, in the production of explosives in the weapon industry and in the production of bombs to silence electronic systems, in the distillation and purification of gases and liquids and health sectors. In this study, it was aimed to expand the usage areas of active carbon (AC) by determining different methods and parametes of active carbon doped fabric with having antimicrobial properties of silver nanoparticles (AgNP) reinforcement.

AgNP's formed colloidal in aqueous solution were obtained by chemical reduction of Silver Nitrate (AgNO₃) with Sodium Borohydride (NaBH₄). Structure and properties of synthesized AgNP's were illuminated by UV-VIS spectrophotometer and Zeta Potential methods. Then, AC doped fabric with the obtained the AgNP's were covered by using different methods such as ultrasonic bath, magnetic stirrer and soaking in solution and effective coating method was specified. Structure analysis of AgNP/AC composite and the amount of AgNP's adsorbed to the surface were determined with Scanning Electron Microscope (SEM), and ICP-OES respectively. According to the obtained data, it was concluded that the AC fabric is covered with AgNP's are the most appropriate method by holding the AC fabric in the ultrasonic bath for 1 hour.

Key Words

" Silver Nanoparticle, Activated Carbon, Adsorption "

1. Giriş

Birçok endüstride değişik amaçlar için kullanılan Aktif Karbon (AC); bileşiminin çoğunluğu karbondan oluşan maddelerin fiziksel veya kimyasal olarak aktive edilmesiyle iç yüzey alanı ve gözenek hacmi arttırılmış maddeler olarak tanımlanabilmektedir (Baytar, 2015).

Aktif karbon iç yüzeyinde çok çeşitli molekülleri adsorplayabildiğinden katı veya gaz fazında çeşitli maddelerin adsorpsiyonu için kullanılmaktadır. Gazların saflaştırılması ve içme suyu arıtılmasında, karışımların ayrıştırılmasında, gıda sanayisinde saflaştırma işlemlerinde, atık su arıtımında, metal sanayisinde karbon katkısında, savunma sanayisinde koruyucu giysi yapımında, silah sanayisinde patlayıcı yapımında ve elektronik sistemleri susturmak için bomba yapımında ve sağlık sektöründe olmak üzere çok geniş bir alanda aktif karbon kullanılmaktadır (Küçükgül, 2004).

Hayvanlardan, minerallerden ve sebzelerden elde edilen çeşitli hammaddeler, aktif karbon üretimi için kaynak olabilmektedir (Yahya vd., 2015). Düşük maliyetli, doğal malzemelerden ve bazı tarımsal atık malzemelerden aktif karbon adsorbanlarının geliştirilmesi üzerine, örneğin; küspe uçucu kül (Gupta, 2002), pirinç çeltiği (Masoud vd.,2012; Wang vd., 2007), kavak yaprağı tozları (Abbas, 2013), portakal kabuğu (Ali vd., 2017), şeker kamışı küspesi (Razi vd., 2018; Amin, 2008), hindistan cevizi kabuğu (Radhika ve Palanivelu, 2006), bambu (Hameed vd., 2007) ve odun talaşı (Prakash vd., 2006) gibi birçok çalışma bulunmaktadır.

Genişletilmiş yüzey alanı, mikro gözenekli yapı, yüksek adsorpsiyon kapasitesi ve yüksek derecede reaktivite, tarımsal atıklardan elde edilen aktif karbon kullanmanın avantajları arasındadır (Razi vd, 2018). Ali ve arkadaşları (2016), adsorpsiyon etkinliğinin adsorban yüzey alanına, yüzey morfolojisine ve gözenek boyutu dağılımına da bağlı olduğunu bildirmiştir.

Yapısal olarak ideal bir aktif karbonda gözenekler özel bir amaç için üretilmemiş ise 0.2-1.0 cm³/g civarında, yüzey alanı ise 400-1000 m²/g aralığında değişkenlik gösterebilir. Gözenek çapı ise 3 Å ile birkaç 1000 Å arasında değişmektedir (Morgan ve Fink, 1989; Çiftçi, 2013). Omri ve Benzina (2012), badem kabuğundan elde ettikleri aktif karbonun BET yüzey alanını 893.62 m²/g ve toplam gözenek hacmini 0.472 cm³/g olarak belirlemişlerdir.

Koruyucu tekstiller hayatın her alanında çok önemli bir yere sahip olmuştur. Özellikle savunma ve biyomedikal uygulamalarda antibakteriyel ve antiviral aktiviteye sahip maddeler içeren malzemelerin geliştirilmesi oldukça geniş bir yer tutmaktadır (Zahran vd., 2014). Bu tekstil malzemelerine antimikrobiyal etki kazandırmak amacıyla çok sayıda kimyasal madde (inorganik tuzlar, organometaller, fenoller, formaldehit türevleri, antibiyotikler, aminler vb) kullanılmaktadır (Lim vd., 2014). Son yıllarda insan sağlığına ve çevreye zararı olmayan antibakteriyel ve antiviral tekstil ürünleri önem kazanmıştır. Bunların başında granüler veya toz haldeki aktif karbon, tekstil endüstrisinde en çok kullanılan adsorbanlardandır (Erkut, 2008). Aynı zamanda tekstil malzemelerine nano boyutlu metal ve metal oksitler takviye edilerek fonksiyonel özellikleri artırılabilir. Özellikle toksit olmayan nano gümüş enfeksiyonları engelleme noktasında dikkat çeken antibakteriyel bir malzemedir (Rajendran vd., 2010).

Nano gümüş, özellikle antimikrobiyal özelliği ile bilinen nano-teknoloji ürünüdür. Gümüş, bakteri proteininin tiyol grupları ile etkileşerek moleküllerine bağlanmakta ve hücrenin metabolik aktivitesini sonlandırarak mikroorganizmayı tamamen yok etmektedir (Lee ve Jeong, 2005). Öte yandan gümüş partiküllerin boyutlarının küçülmesi etkin yüzey alanını artırmakta ve antibakteriyel aktiviteyi geliştirmektedir (Selvam ve Sundrarajan, 2012). Karnip ve ark. (2013), gümüş nitrat'dan kimyasal çöktürme yöntemi ile elde ettikleri gümüş nanopartiküllerinin (AgNP) toz aktif karbona emdirme işlemi uygulamışlar ve içme sularında bulunabilen patojenik *Escherichia coli*'ye (E.coli) karşı antibakteriyel etkinliğini araştırmışlardır. Buna göre; aktif karbon kompozitlerinin su arıtma potansiyellerini ve gümüş emdirmenin içme suyu üretiminde etkili olduğu saptanmıştır.

El-Aassar ve ark. (2013), kimyasal çöktürme yöntemi ile farklı konsantrasyonlarda elde edilen Ag nanopartikülleri AC granüllerine emdirme işlemi uygulayarak suyun saflaştırılması için antimikrobiyal özellikleri incelenmiştir. Batch yöntemi ile temas süresinin artması ve bakteri sayısının azalmasıyla tam inhibisyonun sağlandığını, Sütun testi ile de hazırlanan AgNP/AC toz malzemenin sentetik su ve gerçek kirli su örneklerinde E.coli bakterilerinin azalttığını tespit etmişlerdir.

Nanoteknoloji ve nanopartiküller, havacılık-uzay mühendisliği, nano-elektronik, çevre iyileştirme, gibi uygulamaları ile giderek daha fazla tanınmaktadır (Gerber, ve Lang 2006). Ayrıca gümüş iyonları yara iyileştirici malzemelerde ve antibakteriyel gıda paketlerinde de sıklıkla kullanılmaktadır (Aksoy vd., 2015).

Nanopartiküller; fiziksel, kimyasal ve biyolojik olmak üzere farklı yöntemlerle sentezlenebilir. Ancak fiziksel ve kimyasal sentezleme yöntemleri hem pahalı hem de insan ve çevre sağlığı için oldukça tehlikelidir. Bu nedenle AgNP sentezi için en yaygın yöntem inorganik ajanlar tarafından kimyasal indirgeme yöntemleridir (Antony vd., 2013).

Karbon malzemeler, karbonun kimyasal yapısından dolayı mükemmel adsorpsiyon kapasitesine sahiptir. Fakat bakteriler karbon kaynağı olarak karbonu kullanarak karbon yüzeyinde üreyebilirler. Bu sebeple karbon malzemelere antibakteriyel ajanlar bağlayarak malzemenin antibakteriyel özellikler kazandırılması sağlanır (Ma vd., 2021).

Bu çalışmada, AgNP'ler kimyasal indirgeme yöntemi ile farklı konsantrasyonlarda hazırlandı. Elde edilen AgNP'lerin AC katkı kumaş tarafından adsorplanabilirliği için en uygun yöntem ve parametreler belirlendi. Bu çalışmayı diğer çalışmalardan ayıran en önemli faktör ise kumaşa katılanmış AC'nun BET yüzey alanının yaklaşık 2300 m²/g gibi çok yüksek bir değere sahip olmasıdır. Böylece elde edilen AC/AgNP takviyeli kompozit malzemenin biyolojik ve kimyasal zararlılara karşı savunmada, su arıtma filtrelerinde ağır metal giderimi ve mikrobiyal zararlılara karşı yara örtüleri gibi biyomedikal alanlarda kullanımlarının ekonomik ve çevre dostu olarak artırılması sağlanacaktır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Kullanılan Materyaller

Gümüş nanopartikülleri hazırlamak için gümüş nitrat (% 99,5, AgNO₃, [Panreac&Appllichem](#)), Sodyum Borohidrid (% 98, NaBH₄, FSA Laboratory Supplies), Sodyum Dodesil Sülfat (% 98, SDS) kullanıldı.

Bu çalışmada kullanılan aktif karbon, ipek böceği kozasından elde edilmiş olup BET (Branauer-Emmet-Teller) yüzey alanı 2353 m²/g, Langmuir yüzey alanı 2749 m²/g, gözenek genişliği 3-1,9 nm ve gözenek alanı 1338 m²/g olarak ölçülmüştür. Daha sonra elde edilen amorf yapılı AC, pamuklu (selüloz bazlı) kumaşa katılanmıştır (Dilbilmez, 2019).

2.2. AgNP'lerin Elde Edilmesi

AgNP, Lee ve arkadaşları (2009), tarafından daha önce rapor edilmiş yöntem kullanılarak hazırlandı. Yöntem kısaca şöyledir: 0,0005M-0,002M aralığında farklı derişimlerde AgNO₃ çözeltisi hazırlandı. Daha sonra AgNO₃ derişimlerine bağlı olarak, NaBH₄:AgNO₃ (1:10) ve SDS/AgNO₃ (1:2) oranlarına göre NaBH₄ ve SDS çözeltileri hazırlandı.

Kimyasal indirgeme ile AgNP elde edilmesi için ilk olarak NaBH₄ çözeltisi içerisinde stabilizör (SDS) eklenerek bir stabilizatör çözeltisi elde edildi. Daha sonra elde edilen bu çözelti üzerine AgNO₃ çözeltisi damla damla eklendi ve bir saat boyunca karıştırıldı.

Bu işlem farklı derişimdeki AgNO₃ çözeltileri de kullanılarak gerçekleştirildi. AgNP oluşumu, UV-VIS (Evolution 600) spektrofotometre ile, partikül büyüklüğü ve partikül dağılımlarının belirlenmesi ise ZetaSizer (Malvern Instruments Nano ZS, Malvern, UK) yardımıyla belirlendi.

2.3. AC Katkılı Kumaş/AgNP Takviyesi

AgNP'lerin AC katkı kumaşa adsorpsiyon yolu ile takviyesi için 3 farklı yöntem uygulanmıştır. Bunlar;

Yöntem 1: Ultrasonik Banyo (UB) içerisindeki çözelti içerisinde bekletme,

Yöntem 2: Manyetik Karıştırıcı üzerinde 20 rpm karıştırma hızındaki çözelti içerisinde bekletme,

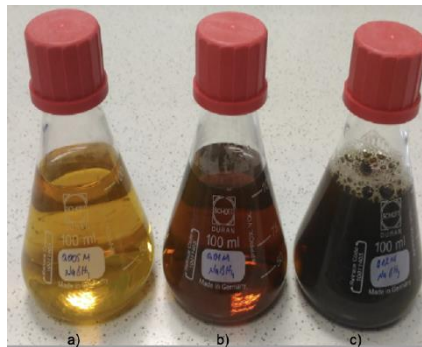
Yöntem 3: Hiçbir dış etkene maruz bırakılmadan çözelti içerisinde bırakılarak bekletme.

Her 3 yöntem için 1x1 cm boyutunda saf kumaş ve AC katkı kumaş numuneler farklı derişimlerdeki AgNP çözeltileri içerisinde 15dk, 30dk, 1sa, 2sa, 4sa, 8sa, 16sa ve 24sa bekletilerek, vakumlu etüvde 4 inchHg basınçta, 50 °C'de 24 saat kurutulmuştur. Daha sonra yüzeysel yapı analizi ve nanopartikül dağılımları Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM, JEOL JSM 5600) ile, adsorplanmış AgNP miktarları ise İndüktif Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektroskopisi (ICP-OES, Perkin Elmer) kullanılarak belirlendi.

3. Bulgular ve Tartışma

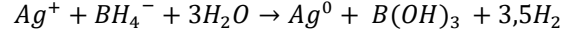
3.1. AgNP Sentezinin Optimizasyonu

Kimyasal indirgeme yöntemi ile edilen farklı başlangıç AgNO₃ konsantrasyonlarına (0,0005M, 0,001M ve 0,002M) sahip koloidal AgNP'ler Şekil 1'de görüldüğü gibi çözeltilerin rengi başlangıç konsantrasyonunun artırılmasıyla sarıdan kahverengiye değişmiştir.



Şekil 1. AgNO₃ konsantrasyonunun etkisi: (a) 0,0005 M (b) 0,001 M (c) 0,002 M

Aşağıdaki reaksiyon sonucunda NaBH_4 'ün hidrolizi yoluyla üretilen bor hidroksitin yüzeyin elektron yoğunluğunu azaltarak AgNP'lerin oluşmasına ve derinde toplanmasına neden olur (Liu vd., 2007).



AgNP'lerin UV-VIS spektrumlarının 400 nm'de emilim ve soğurma piki verdiği ve emilim pikinin tepe noktası ne kadar dar olursa nanopartiküllerin yayılmasının da o derece iyi olacağı bilinmektedir (Kim vd., 2004).

Bu çalışma için hazırlanmış olduğumuz 3 farklı AgNO_3 konsantrasyonuna sahip çözeltilerin Zeta Potansiyel test sonuçları Tablo 1'de, UV-VIS spektrumları ise Şekil 2'de gösterilmiştir.

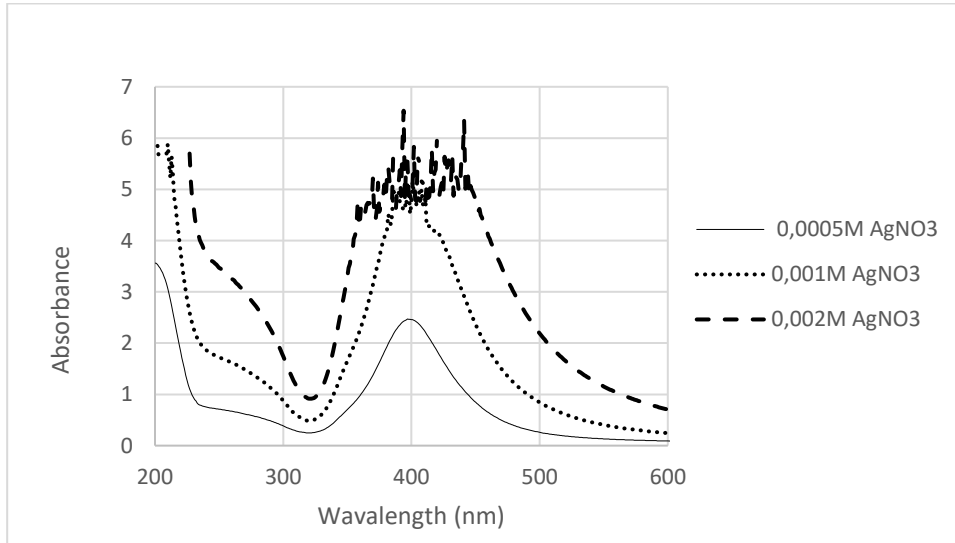
Zeta potansiyeli genellikle +30 mV değerinden daha pozitif veya -30 mV değerinden daha negatif olması istenir. Tane boyutu küçüldükçe negatif yüzey yükleri artar ve zeta potansiyel negatif değer alır (Çanayaz, 2016). Tablo 1'de verilen sonuçlara göre 0,0005M konsantrasyonlu çözelti içerisindeki AgNP'lerin istenilen homojenlikte dağılım sergilediği, 0,001M ve 0,002M konsantrasyonlu çözeltilerde ise artan konsantrasyonla homojenliğin kaybolduğu ve kararlı bir yapıdan uzaklaşıldığı gözlenmiştir.

Tablo 1. Kollaidal AgNP çözeltilerinin Zeta Potansiyel ve tane boyutları

Numune Nu.	Çözelti İçerisindeki AgNO_3 Konsantrasyonu	Zeta Potansiyel (mV)	Tane Boyutu (d.nm)
1	0,0005M	-40,0	31,04
2	0,001M	-28,4	19,66
3	0,002M	-14,8	18,05

Şilekaité ve arkadaşları (2009), gümüş nitratı sodyum sitrat ile indirgeyerek oluşturdukları AgNP'lerin SEM analizi ile 45 nm - 50 nm aralığında küresel nanopartiküller elde etmişler ve sentez aşamalarında farklı boyutlarda nanopartiküller elde edilebileceğini söylemişlerdir.

UV-VIS spektrum sonuçları incelendiğinde ise; AgNO_3 konsantrasyonu arttırıldığında emilim pik yoğunluğunun zirvelerde dağılarak arttığı, soğurma pikinin genişlediği ve nanopartiküllerin kümelenmediği görüldü. Ancak düşük konsantrasyonda daha dar bir emilim zirvesi elde edilmesi düşük konsantrasyonda nanopartiküllerin daha iyi dağılmış ve kümelenmiş olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 3. Kolloidal AgNP Çözeltilerinin UV-VIS Spektrofotometre Sonuçları

Az miktarda NaBH_4 kullanıldığında, çok ince BH_4 tabakası bor hidroksitin yüzey emilimini ve elektron yoğunluğunu artırarak AgNP'lerin kümelenmesine neden olur. Buda NaBH_4 'ün sadece indirgeyici bir ajan olarak değil aynı zamanda gümüş nanoparçacıkların kümelenmesini de önleyen bir dengeleyici olduğunu gösterir. Ayrıca SDS'nin çözeltide kullanılmasının temel amacı, büyüme ve kümelenmeden kaynaklanan AgNP'lerin koloidal bir halde çözelti içerisinde kalmasını sağlamaktır (Lee vd., 2009). Yine Şekil 2'den de anlaşılacağı gibi konsantrasyon arttırılıp SDS oranı sabit kaldığında soğurma tepelerinin dağıldığı, SDS/ AgNO_3 ağırlık oranının AgNO_3 'ün düşük konsantrasyonunda AgNP'leri soğurma tepelerinde bir araya topladığı ve iyi bir şekilde dağıttığını göstermiştir.

3.2. AC Katkılı Kumaş/AgNP Adsorpsiyon Analizleri

İndüktif Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektroskopisi (ICP-OES); kimyasal elementlerin tespiti için kullanılan analitik bir tekniktir (Bakırdere vd., 2011). AgNP'lerin AC katkılı kumaşa takviyesi için en uygun 3 farklı bekleme yöntem ve süresinin belirlenebilmesi için ICP-OES testi yapılmıştır.

AC katkılı kumaş numunesinin UB içerisinde bekleme sonrası AgNP adsorbans miktarları, farklı bekleme süreleri Tablo 2'de verilmiştir. Buna göre 3, 4 ve 5 nolu numunelerde sırasıyla $0,454 \pm 0,005$, $0,450 \pm 0,002$ ve $0,450 \pm 0,003$ mg/kg olduğu ve AgNP miktarının çok fazla değişmediği görülmektedir. Bu nedenle AC katkılı kumaşın uzun süre beklemeden adsorpsiyon verimini artmasına pozitif yönde bir katkı sağlamadığını söyleyebilir. Sonuç olarak, çözelti içerisinde en uygun bekleme süresinin 1 saat olduğu belirlenmiştir.

AC katkılı ve saf kumaş numunelerine uygulanan farklı bekleme yöntemleri sonucunda elde edilen AgNP miktarları (ICP-OES) ise Tablo 3'de verilmiştir. AC'li kumaşın AgNP miktarlarının tüm yöntemlerde saf kumaşa göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu da aktif karbonun yüksek yüzey alanına ve organik bileşenlerinin yüksek absorplama kapasitesine sahip olmasından kaynaklıdır. Kullanılan bekleme yöntemleri kıyaslandığında ise en yüksek AgNP miktarının ultrasonik banyo ile gerçekleştiği saptanmıştır. Magnetik karıştırıcı yöntemi ile kumaş üzerinde bulunan aktif karbon parçacıklarının bir miktar dökülmesine sebep olmasıyla takviye eleman miktarının azalmasına sebep olmuştur.

Ma ve arkadaşları (2021), karbon kaynağı olarak bakteriyel selüloz kullanılarak AgNP'li antibakteriyel karbonize selüloz (CBC) kompozit üretmişlerdir. CBC'nin AgNP miktarı, yüzeyi ve gözenek yapısının AgNO₃ çözeltisinin başlangıç konsantrasyonuna bağlı olduğunu saptamışlardır. Ayrıca, Ag/CBC kompozitinin mükemmel antibakteriyel aktivite sergilediğini tespit etmişlerdir.

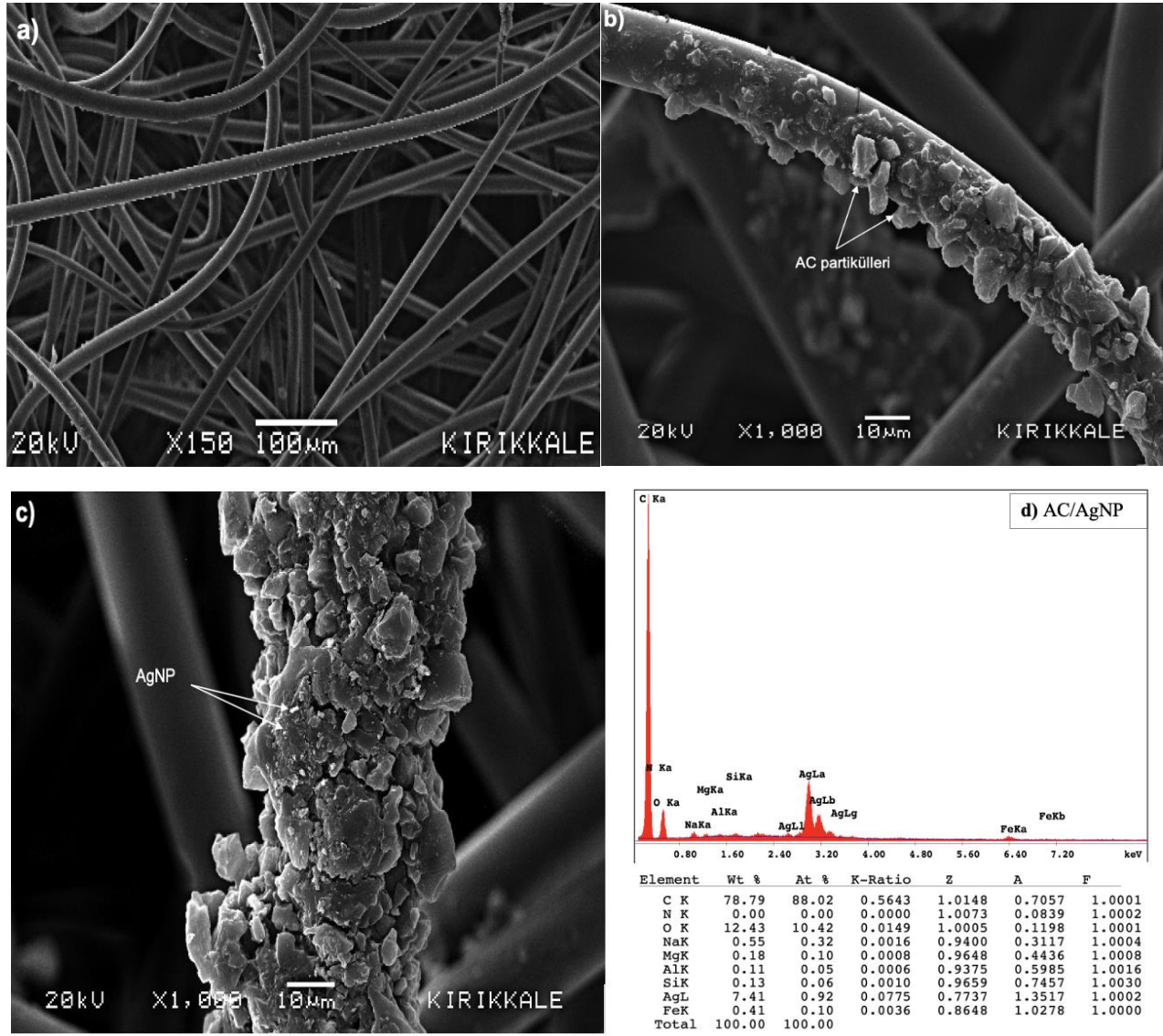
Tablo 2. UB İçerisinde Bekletilmiş AC Kumaş Numunelerinin ICP-OES Test Analizi

Numune Nu.	UB İçerisinde Bekleme Süresi	Adsorplanmış Ag ⁺ Miktarı (mg/kg)	Con SD (mg/kg)
1	15 Dakika	0,101	$\pm 0,020$
2	30 Dakika	0,328	$\pm 0,090$
3	1 Saat	0,454	$\pm 0,005$
4	2 Saat	0,450	$\pm 0,002$
5	4 Saat	0,450	$\pm 0,003$
6	8 Saat	0,112	$\pm 0,040$
7	16 Saat	0,191	$\pm 0,020$
8	24 Saat	0,184	$\pm 0,020$

Tablo 3. Bekletme Yöntemleri ile Kumaş Numunelerinin ICP-OES Test Analizi

Numune	Yöntem	Numune Türü	Bekletilme Süresi	Adsorplanmış Ag ⁺ Miktarı (mg/kg)	Con SD (mg/kg)
1	Bekletme	Saf kumaş		0,051	0,002
2	Bekletme	AC'li		0,051	0,008
3	Ultrasonik Banyo	Saf Kumaş	1 saat	0,190	0,002
4	Ultrasonik Banyo	AC'li		0,603	0,003
5	Magnetik Karıştırıcı	Saf Kumaş		0,332	0,002
6	Magnetik Karıştırıcı	AC'li		0,345	0,002

AC katkılı ve saf kumaşın SEM görüntüleri Şekil 4 (a,b) ile UB içerisindeki çözelti içerisinde 1 saat bekletilerek AgNP takviyeli kompozit malzemenin SEM-EDS analiz sonuçları Şekil 4(c,d)'de verilmiştir.



Şekil 4. UB içerisinde (0,0005 M konsantrasyonlu çözelti) 1saat bekleme sonrası (a) Saf kumaş (b) AC katkılı (c) AC/AgNP katkılı kumaşın SEM görüntüleri (d) AC/AgNP EDS spektrum verileri

Çakar ve ark. (2015), pamuklu kumaşlara korona plazma ile AgNP ve çinko oksit nano partikülleri (ZnO-NP) takviye ederek yıkanmaya karşı yıpranmasını araştırmışlar ve gram pozitif *Staphylococcus aureus* (*S.aureus*) bakterisine karşı etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir. Bakar ve ark. (2021), muz kabuğundan elde edilen aktif karbonu atık-su filtre kumaşlarına adsorpsiyonu ile içme sularındaki ağır metallerin uzaklaştırılması hakkında araştırma çalışması yapmışlar ve Cd^{+2} , Ni^{+2} , Cu^{+2} , Pb^{+2} ve Zn^{+2} ağır metallerin uzaklaştırılması için kullanılan adsorbanın yüksek gözeneklilik ve yüzey alanı ile hazırlanması gerektiğini saptamışlardır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, uygun bir indirgeyici olan Sodyum borohidrid ve dengeleyici olarak Sodyum Dodosil Sülfat varlığında Gümüş Nitrat konsantrasyonu azaltılarak kararlı gümüş nanopartikülleri elde etmek için uygun bir çözelti başarıyla hazırlandı. Elde edilen çözeltinin Zeta Potansiyeli AgNP'erin istenilen homojenlikte dağılım sergilediğini, UV-VIS spektrumları ise Gümüş Nitratın azalan konsantrasyonuyla nanopartiküllerin daha iyi dağılmış ve kümelenmiş olduğunu doğruladı. Buna göre 0,0005M konsantrasyonlu $AgNO_3$ çözeltisinden d(nm) 31,04 nm tane boyutlu AgNP elde edilmiştir.

Elde edilen AgNP'lerin AC Katkılı Kumaş tarafından adsorplanması için çözelti içerisinde en ideal bekleme süresi ve bekleme yöntemi belirlendi. Buna göre ultrasonik banyoda 1 saat bekleme AgNP'lerin AC katkılı kumaş yüzeyleri tarafından başarıyla adsorplandığı SEM görüntüleri ile, nanopartiküllerin yüzeydeki miktarsal varlığı ise ICP-OES test cihazları ile doğrulandı.

AC katkılı kumaş üzerine kaplanan gümüş nanoparçacıkların miktarını belirleyen en önemli etkenlerin; AgNP çözelti konsantrasyonu, adsorplama yöntemi ve bekletilme süresi olduğu belirlenmiştir. Kullanılan AC'lu kumaşın çok yüksek yüzey alanı ve gözenek yapısı AgNP'lerin adsorplanmasındaki etkisi bu çalışmanın en önemli sonuçlarındandır.

Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan aktif karbon kaplı kumaşı üreten Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi öğretim üyesi Prof. Dr. Selçuk Aktürk'e teşekkürlerimizi borç biliriz.

Referanslar

- Abbas, F. S. (2017). Dyes removal from wastewater using agricultural waste. *Adv. Environ. Biol.* 7 (6), 1019–1026, 2013.
- Aksoy S., A., Çakar A., Korkmaz N. (2015). Korona Plazma ile Aktive Edilmiş Pamuklu Kumaşa Gümüş ve Çinko Oksit Nanopartikül Aplikasyonu, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 19 (2), 78-85.
- Ali, H.H, Abdel-Satar, Amaal M. (2017). Removal of some heavy metals from aqueous solutions using natural wastes orange peel activated carbon. *J. Appl. Sci.* 3 (3), 13–30.
- Ali A., Saeed K., Mabood F. (2016). Removal of chromium (VI) from aqueous medium using chemically modified banana peels as efficient low-cost adsorbent. *Alexandria Eng. J.* 55 (3), 2933–2942.
- Amin N. K. (2008). Removal of reactive dye from aqueous solutions by adsorption onto activated carbons prepared from sugar- cane bagasse pith, *Desalination* 223, 152–161.
- Antony J. J., Nivedheetha M., Siva D., Pradeepha G., Kokilavani P., Kalaiselvi S., Sankarganesh A., Balasundaram A., Masilamani V., Achiraman S. (2013). Antimicrobial Activity of Leucas Aspera Engineered Silver Nanoparticles Against Aeromonas Hydrophila in Infected Catla Catla. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 109: 20-24.
- Bakar N. A., Othman N., Yunus Z. M., Altowayti W. A. H., Tahir M., Fitriani N., Mohd-Salleh S. N. A. (2021). An insight review of lignocellulosic materials as activated carbon precursor for textile wastewater treatment, *Environmental Technology & Innovation* 22, 101445.
- Bakirdere, S., Aydin, F., Bakirdere, E. G., Titretir, S. (2011). Akdeniz, İ., Aydin, I., Yildirim, E., Arslan, Y., From mg/kg to pg/kg levels: a story of trace element determination: a review. *Applied Spectroscopy Reviews*, 46: 38–66.
- Baytar., O. (2015). İğde Çekirdeği ve Kayın Ağacından Üretilen Aktif Karbonun Ağır Metal Ve Boyarmadde Gideriminde Kullanılması., Doktora Tezi., Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü., Konya.
- Çakar A., Aksoy s. A., Korkmaz N. (2015). Korona Plazma ile Aktive Edilmiş Pamuklu Kumaşa Gümüş ve Çinko Oksit Nano Partikül Aplikasyonu, Suleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Science, 19(2), 78-85.
- Çanayaz Y. (2016), Farklı İyonik Çevrelerde Membranların Yüzey İletkenliğinin Zeta Potansiyeli Üzerine Etkileri, Yüksek Lisans, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- Çiftçi H. (2013). Aktif Karbonla Topraktan Tuz Adsorpsiyonu Yolu İle Tuzlanmış Tarım Arazilerinin Islah Edilebileceğinin Araştırılması, Yüksek Lisans, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Şanlıurfa.
- Dilbilmez S. G. (2019). KBRN (Kimyasal, Biyolojik, Radyasyon, Nükleer) Tehditlere Karşı Koruyucu Malzemelerin Geliştirilmesi, Yüksek Lisans, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla.
- El-Aassar A. H. M., Said M. M., Abdel-Gawad A. M., Shawky H. A. (2013). Using Silver Nanoparticles Coated on Activated Carbon Granules in Columns for Microbiological Pollutants Water Disinfection in Abu Rawash area, Great Cairo, Egypt, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(1): 422-432.
- Erkut, E. (2008). Aktif Karbon Adsorpsiyonu ile Boyarmadde Giderimi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye, 39-71.
- Gerber C, Lang HP. (2006). How the doors to the nano-world were opened. *Nature Nanotechnology*, 1 (1): 3.
- Gupta, Vinod K., Jain, C.K., Ali, Imran, Chandra, S., Agarwal, S. (2002). Removal of lindane and malathion from wastewater using bagasse fly ash - A sugar industry waste. *Water Res.* 36 (10), 2483–2490.

- Hameed B.H., Din A.T.M., Ahmad A.L. (2007). Adsorption of methylene blue onto bamboo-based activated carbon: Kinetics and equilibrium studies, *J. Hazard. Mater.* 141, 819–825.
- Karnib M., Holail H., Olama Z., Kabbani A., Hines M. (2013). The Antibacterial Activity of Activated Carbon, Silver, Silver Impregnated Activated Carbon and Silica Sand Nanoparticles against Pathogenic *E. coli* BL21, *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci.*, 2(4): 20-30.
- Kim K. D., Han D. N. and Kim H. T. (2004). *Chem. Engin. J.*, 104, 55.
- Küçükgül E. Y. (2004). Production Of The Commercial Activated Carbon And Determination Of The Properties, *Deü Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 6 (3), 41-56.
- Lee, B., S., Song, K., C., Lee, S., M., Park, S., T. (2009). Preparation of colloidal silver nanoparticles by chemical reduction method, *Korean J. Chem. Eng.*, 26 (1), 153-155.
- Lee J., Jeong S. (2005). Bacteriostasis and Skin Innoxiousness of Nanosize Silver Colloids on Textile Fabrics. *Textile Research Journal*, 75, 551-556.
- Lim S., H., Hudson, S., M. (2004). Application of a Fiber- Reactive Chitosan Derivative to Cotton Fabric as an Antimicrobial Textile Finish. *Carbohydrate Polymers*, 56, 227-234.
- Liu J., Lee J. B., Kim D. H., Kim Y. (2007). *Colloids Surf. A*, 302, 276.
- Ma B., Chaudhary J. P., Zhu J., Sun B., Chen C., Sun D. (2021). Construction of silver nanoparticles anchored in carbonized bacterial cellulose with enhanced antibacterial properties, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 611, 125845.
- Masoud, Mamdouh S., El-Saraf, Wagdi M., Abdel-Halim, Ahmed M., Ali, Alaa E., Mohamed, Essam A., Hasan, Hamad M.I. (2012). Rice husk and activated carbon for waste water treatment of El-Mex Bay, Alexandria Coast, Egypt. *Arab. J. Chem.* 1–8.
- Morgan I., Fink C. E. (1989). “Activated Carbon Production”, *Chem. Ind. Eng.* 2, 219 Norit (1983): “Activated Carbon” Main Grades of Norit Activated Carbon and their Applications, Amersfoort, The Netherlands.
- Omri A., Mourad Benzina M. (2012). Adsorption characteristics of silver ions onto activated carbon prepared from almond Shell, *Desalination and Water Treatment*, 5(10-12), 2317-2326.
- Prakash Kumar B.G., Shivakamy K., Miranda L. R., Velan M. (2006). Preparation of steam activated carbon from rubber- wood sawdust (*Hevea brasiliensis*) and its adsorption kinetics, *J. Hazard. Mater.* B136, 922–929.
- Radhika M., Palanivelu K. (2006). Adsorptive removal of chlorophenols from aqueous solution by low cost adsorbent-kinetics and isotherm analysis, *J. Hazard. Mater.* B138 116–124.
- Rajendran R., Balakumar C., Mohammed A. H. A., Jayakumar S., Vaideki K., Rajesh E., M. (2010). Use of Zinc Oxide Nano Particles For Production of Antimicrobial Textiles. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2(1), 202-208.
- Razi, Mohd Adib Mohammad, Al-Gheethi, Adel, Izzatul Ashikin, Z.A. (2018). Removal of heavy metals from textile wastewater using sugarcane bagasse activated carbon. *Int. J. Eng. Technol.* 7 (4.30), 112–115.
- Selvam S., Sundrarajan M. (2012). Functionalization of Cotton Fabric with PVP/ZnO Nanoparticles for Improved Reactive Dyeability and Antibacterial Activity. *Carbohydrate Polymers*, 87,1419-1424.
- Šilekaitė A., Puišo J., Prosyčėvas I., Tamulevičius S. (2009). Investigation Of Silver Nanoparticles Formation Kinetics During Reduction Of Silver Nitrate With Sodium Citrate, *Materials Science (Medžiagotyra)*. Vol. 15, No. 1.
- Yahya, M.A., Al-Qodah, Z., Ngah, C.Z. (2015). Agricultural bio-waste materials as potential sustainable precursors used for activated carbon production: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 46, 218–235.
- Zahrán M.K., Ahmed H.B.; El-Rafie M. H. (2014). *Carbohydrate Polymers*, 108, 145-152.
- Wang S.L., Tzou Y.M., Lu Y.H., Sheng G. (2007). Removal of 3-chlorophenol from water using rice-straw-based carbon, *J. Hazard. Mater.* 147 313–318.



Ti-6Al-4V Alaşımının Tornalanmasında Minimum Miktarda Yağlama (MMY) Yöntemi İle Kesme Sıvısı Uygulamanın İşlenebilirliğe Etkilerinin Araştırılması

Investigation of the Effects of Cutting Fluid Application on Machinability by Using the Minimum Quantity Lubrication (MQL) Method in Turning Ti-6Al-4V Alloy

Kanay Zeyrek¹ , Ali Osman Er*¹ 

¹Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 01/04/2021

Kabul / Accepted: 30/05/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 18/06/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Ti6Al4V alaşımı kullanım yerinde avantaj sağlayacak yüksek sertlik ve aşınma dayanımı, ısıl direnç gibi özelliklere sahip olması sebebiyle talaşlı imalatla şekillendirme işlemlerinde kesici takım malzemelerinde ciddi manada güçlükler çıkarmaktadır. Bu sebeple kesici takım ve iş parçası arasındaki etkileşimi olabildiğince en aza indirmek gerekmektedir. Hali hazırda sektörde bunu sağlayabilmek için geleneksel kesme sıvısı yöntemi kullanılmaktadır. Fakat bu durum bize maliyet ve insan sağlığı gibi çeşitli sıkıntılar olarak geri dönmektedir. Yapılan bu deneysel çalışmada, Ti6Al4V alaşımı TiAlN kaplı kesici takımla önce kesme sıvısı kullanılmadan tornalanmış, daha sonra karşılaştırma yapmak için aynı kesme parametreleriyle MMY (MQL) sistemin içerisine ticari bitkisel bazlı kesme sıvısı eklenerek tornalamaya tabi tutulmuştur. Deney sonuçları kesme kuvveti, sıcaklık ve yüzey pürüzlülüğü cinsinden karşılaştırılmış ve MMY işleme yönteminin kuru işlemeye kıyasla performans farklılıkları hesaplanmıştır. Kesme kuvvetinde, sıcaklıkta ve yüzey pürüzlülüğündeki fark oranları değişen işleme değişkenleri ile sırasıyla %50, %90 ve % 67'ye varan oranlarda azalmaktadır. İşleme değişkenlerinin kesme kuvvetine etki oranları, kesme derinliğinde azalırken, ilerleme ve kesme hızında artmaktadır. Sıcaklıktaki etki oranlarındaki değişim ise, ilerleme ve kesme derinliğindeki oran artarken, kesme hızının etkisi azalmaktadır. Yüzey pürüzlülüğüne ilerleme değişiminin etkisi artarken, kesme derinliği ve kesme hızının etkisi azalmaktadır.

Anahtar Kelimeler

“Minimum Miktarda Yağlama(MMY), Ti6Al4V Alaşım, Tornalama, Kesme Kuvveti, Sıcaklık, Yüzey Pürüzlülüğü”

Abstract

Ti6Al or ASTM Grade 5, Ti-6Al-4V alloy is one of the most widely used titanium alloys in aerospace, automotive and biomechanical applications. This alloy creates serious difficulties in the materials of the cutting tool due to its high hardness and abrasion resistance and thermal resistance. For these reasons, it is necessary to minimize the interaction between the cutting tool and the workpiece as much as possible. The conventional coolant method is currently used in the industry to achieve this. However, this situation comes back to us as various problems such as cost and human health. In this experimental study, MQL system was used instead of the traditional method of machining Ti-6Al-4V alloy with TiAlN coated cutting tool and turning was performed by adding commercial vegetable-based cutting fluid into the system. Experiments were repeated by dry processing method for comparison. The experimental results were compared in terms of cutting force, temperature and surface roughness, and the performance differences of the MQL machining method compared to dry machining were calculated. The difference rates in cutting force, temperature and surface roughness decrease up to 50%, 90% and 67%, respectively, with varying processing variables. While the effect ratios of machining variables on the cutting force decreases with MQL at depth of cut, they increase in feed rate and cutting speed. On the other hand, the change in the effect rates in temperature, the effect of the feed rate and cutting depth increases with MQL, while the effect of the cutting speed decreases. While the effect of the feed rate on the surface roughness increases with MQL, the effect of cutting depth and cutting speed decreases.

Key Words

“Minimum Quantity Lubrication(MQL), Ti6Al4V Alloy, Turning, Cutting Force, Temperature, Surface Roughness”

1. Giriş

Talaşlı imalat uygulamalarında özellikle kesme bölgesinde fazla sıcaklığın oluştuğu uygulamalarda kesme sıvılarının faydası yadsınmaz. İmalat işlemlerinde kesme sıvıları; kesme derinliği, ilerleme, kesme hızı gibi işleme parametrelerinin yüksek olduğu uygulamalarda; yüzey pürüzlülüğü, sıcaklık, kesme kuvveti ve takım aşınması gibi işlenebilirlik parametreleri üzerinde önemli bir rol oynar. Çevresel felaketlerin her geçen gün daha fazla yaşandığı son yıllarda, imalat sektörü, diğer tüm alanlarda olduğu gibi sürdürülebilirliği önemsemektedir (D. Fratila, 2010). Fakat kesme sıvıları ise talaşlı imalatta sürdürülebilirliği olumsuz etkileyen faktörlerin başında gelmektedir. Sürdürülebilirlik ekolojik, toplumsal ve ekonomik açıdan değerlendirilmektedir. Kesme sıvısı kullanımı yukarıda belirttiğimiz üç ana başlık dikkate alınarak değerlendirildiğinde, toplam maliyeti arttırmakla kalmayıp özellikle insan sağlığına ve çevreye zarar vermektedir. Bu nedenle geleneksel kesme yöntemlerine alternatif olarak çeşitli işleme yöntemleri araştırılmıştır ve araştırmalar sürdürülebilirliği sağlamak için devam etmektedir.

Araştırmaların yoğunlaştığı yöntemler arasında MMY-MQL (Minimum Miktarla Yağlama - Minimum Quantity Lubrication) ilk sıralarda gelir. MMY sayesinde kesme sıvısı tüketimi, yani toplam maliyet azalmaktadır. Bunun yanı sıra çeşitli çalışmalarda işleme parametreleri ve işlenebilirlik konusunda da iyi yönlü iyileşme gözlemlenmiştir. MMY sisteminin çalışmasında aynı zamanda basınçlı hava da rol oynadığı için, bu basınçlı hava aracılığıyla kesici takım ve malzeme arasındaki talaşlar uzaklaştırılarak oluşan ısının azalmasına yardımcı olduğu belirtilmektedir.

Khan vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada, MMY sistemi ile deneysel olarak çalışılmış bu yöntemde bitkisel yağ bazlı kesme sıvısı kullanılmışlardır. İş parçası olarak düşük alaşımlı AISI 9310 çelik kullanmış ve tormalama işlemine tabi tutmuşlardır. Sonuç olarak takım aşınmasındaki azalmanın, yüzey kalitesini ve kesici takımın ömrünü arttırdığını gözlemlemişlerdir. Buna ek olarak MMY'in sağlık açısından daha iyi ve çevre dostu olduğundan, hem işlenebilirlik açısından avantajlı hem de sürdürülebilir bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir.

Marques vd. (2011) yaptıkları çalışmada, Inconel 718 iş parçasının tormalama işlemi sırasında, üç farklı kesme işlemi üzerinde yüzey bütünlüğünü, işlenebilirlik koşullarını ve kesme parametrelerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmadan elde ettikleri sonuç olarak, MMY sistemi kullanımının yüzey karakteristiğini iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir.

Meena ve Mansori (2011) yaptıkları çalışmada delik delme işlemlerinde, kesici takımın aşınmasını düşürmek, takım ömrünü uzatmak ve sürdürülebilirlik doğrultusunda soğutucu akışkan tüketimini en aza miktara indirmeyi amaçlamışlardır. Sertleştirilmiş sünek döküm (ADI) malzemenin, TiAlN tungsten kaplamalı karbür takım ile kuru ve MMY yöntemi kullanılarak işlenmesi incelemişlerdir. Sonuçlar, MMY ile işlemede takım aşınmasında, kesme kuvvetinde ve yüzey pürüzlülüğünde azalma olduğunu, kesme bölgesindeki sıcaklıklarda düşüş olduğu gözlemlenmiştir.

Basmacı (2012) yaptığı çalışmada kesme parametrelerinin; kesme kuvvetleri, sıcaklık ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini tormalamada, MMY ve kuru işleme yöntemlerini karşılaştırılarak incelemiştir. MMY sisteminin talaş kaldırma esnasında oluşan sıcaklık, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini, önemli oranda takım talaş ara yüzünde sürtünme katsayısını azaltarak bu değerlerin düşürülmesine katkı sağladığını gözlemlemiştir. Hastelloy C-22 malzemesinin işlenmesinde çok düşük ortalama pürüzlülük değerlerine ulaşıldığı ve daha sonra herhangi bir işleme gerek kalmayacak şekilde yüzey kalitesi elde edildiğini belirlemiştir.

Hadad ve Sadeghi (2013) tarafından yapılan çalışmada, AISI 4140 çelik alaşımlı iş parçasının torna tezgahında deneysel olarak işlenmesini incelemişlerdir. MMY işleme yönteminin nozul lokasyonunun ve kesme parametrelerinin sonuca nasıl etki ettiğini gözlemlemişlerdir. Kuru işleme ile MMY işleme yöntemi arasında bir kıyaslama yaptıklarında ise kesme performansı, takım ömrü ve yüzey kalitesini arttırdığını belirtmişlerdir.

Sarıkaya vd. (2014) AISI 1050 çeliğinin tormalanmasını kuru, ıslak ve MMY ile gerçekleştirerek yüzey pürüzlülüğüne etkilerini incelemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü açısından en iyi sonucu 120ml/h akış hızlı MMY, 200 m/dak kesme hızında, 0,07mm/devir ilerleme ve 1,2 mm kesme derinliğinde elde etmişlerdir. Yüzey Pürüzlülüğüne en fazla etkileyen faktörler %68,68 ile ilerleme, %16,98 ile soğutma tipi, %9,98 ile kesme hızı ve %1,09 ile kesme derinliği olmuştur.

Ekinovic vd. (2015) yaptıkları çalışmada, St52 çeliğinin tormalamasında kuru kesme ve MMY sisteminin içerisine koydukları yağ ve suyun etkilerini kıyaslamışlardır. Kesme kuvvetlerinin kuru işlemeye oranla %17 oranına kadar azaldığını gözlemlemişlerdir. MMY sisteminin içerisine koydukları yağın 10 ml/h ve suyun 1,7 l/h olarak belirleyip yaptıkları deneylerde minimum kesme kuvvetini elde ettiklerini gözlemlemişlerdir.

Rahim vd. (2015) AISI 1045 çeliğinin işlenmesinde kesme sıvısı olarak MMY tekniği altında sentetik ester kullanmışlardır. Deneysel çalışmalarında kesme kuvveti, takım-talaş temas uzunluğu, kesme sıcaklığı, talaş kalınlığı açısından MMY tekniğini kuru işleme ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak kesme sıcaklığında, MMY' nin kuru işlemeye kıyasla %10 ila %30 arasında azalma tespit etmişler ve böylece takım ömrünü iyileştirdiğini ve sürdürülebilir üretime katkıda bulunduğunu gözlemlemişlerdir. Kesme kuvvetinde ise, MMY' in kuru işlemeye kıyasla %5 ila %28 arasında azalma tespit etmişlerdir. Bunun nedenini; düşük sürtünme katsayısı ve kesme bölgesine giren daha küçük parçacık boyutuna sahip kesme sıvısı olduğunu belirtmişlerdir.

Moura vd. (2015) Ti64 alaşımını kuru, ıslak ve MMY sistemi altında tormalama işlemine tabi tutmuşlardır. Katı yağlayıcılar kullanıldığında ıslak ve kuru işlemeye kıyasla yüzey kalitesinde iyileşme gözlemlemişlerdir. Katı yağlayıcıların kullanılmasının takım

ömrünün artmasına neden olduğu tespit etmişlerdir. Katı yağlayıcıların talaş ve takım ara yüzüne nüfuz edebilmesi sayesinde hem soğutma hem de yağlama fonksiyonlarını yerine getirdiği için takım ömrünü attırdığını belirtmişlerdir. Katı yağlayıcıların kullanılmasının, kuru ve ıslak işlemeyle kıyasla kesme kuvvetlerini azalttığını, sürtünme etkilerini en aza indirdiğini belirtmişlerdir.

Sharma vd. (2016) AISI 1040 çeliğinin tormalanmasında çeşitli soğutma sıvısı performanslarını kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve aşınma cinsinden karşılaştırmıştır. Deneyleri kuru, konvansiyonel soğutma sıvısı, MMY ile normal soğutma sıvısı ve MMY ile nano partiküllü soğutma sıvısı kullanarak gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak MMY nano, kesme kuvveti değerinde, kuru kesmeye göre ~ % 59,1, konvansiyonel soğutma sıvısına göre ~%29,2 ve MMY normal soğutma sıvısına göre ~%28,6 oranında azalmıştır. Aşınma sırasıyla ~ % 63,9, ~%44,9 ve ~%5,27, yüzey pürüzlülüğü ise ~ %47,8, ~%29,1 and ~%25,5 oranlarında azalmıştır.

Nouioua vd. (2017) DIN X210Cr12 takım çeliğini kuru, ıslak ve MMY ortamda tormalamaya tabi tutmuşlar ve değerlendirmeyi yüzey tepki metodolojisini (RSM-Response Surface Methodology) kullanarak yapmışlardır. Aynı zamanda yapay sinir ağlarını (ANN-Artificial Neural Network) kullanarak tahminde bulunmuşlardır. Varyans analizi neticesinde kesme kuvveti için yüzde etki oranlarını sırasıyla kuruda kesme hızı 1,14, ilerleme 20,66 ve kesme derinliği 72,86, ıslakda kesme hızı 0,71, ilerleme 19,66 ve kesme derinliği 75,81 ve MMY'de ise kesme hızı 0,31, ilerleme 21,57 ve kesme derinliği 72,30 olarak bulmuşlardır. Yüzey pürüzlülüğü için ise yüzde etki oranlarını sırasıyla kuruda kesme hızı 0,15, ilerleme 40,46 ve kesme derinliği 0,67, ıslakda kesme hızı 0,74, ilerleme 52,40 ve kesme derinliği 0,65 ve MMY'de ise kesme hızı 0,66, ilerleme 41,04 ve kesme derinliği 2,27 olarak bulmuşlardır.

Elbah vd. (2019) yaptıkları çalışmalarda AISI 4140 düşük alaşımlı çeliğin sert tormalanmasında, çeşitli işleme ortamlarındaki performansların yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti açısından değerlendirmelerini sunmuşlardır. MMY işlemenin kıyaslanabilmesi açısından kuru ve geleneksel işlemeyle aynı parametrelerde deneyleri tekrarlamışlardır. Daha iyi yüzey kalitesi için optimum parametrelerin, kuru ve MMY işlemleri kullanırken yüksek kesme hızında ve düşük ilerleme hızında elde edildiğini belirtmişlerdir.

Yücel vd. (2019) AA2024 Alaşımının tormalanmasında MMY parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı üzerine etkilerini araştırmışlardır. En iyi sonuçları 100 ml/s debi, 8 bar basınç ve %0,6 konsantrasyon oranı ile elde etmişlerdir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğüne en fazla etki eden parametrenin %40,58 ile basınç olduğunu ve sıcaklığa en fazla etki eden parametrenin ise %28,96 ile konsantrasyon oranı olduğunu tespit etmişlerdir.

Gajran. (2020) Ti6Al4V alaşımının tormalanmasında kuru, MMY ve kroyojenik MMY yöntemlerini karşılaştırmıştır. Kuru kesmeye göre kroyojenik MMY ile kesme kuvvetinde 27% ve yüzey pürüzlüğünde %46 azalma gözlemlenmiştir.

Yapılan bu çalışmalar incelendiğinde Minimum Miktarla Yağlamanın (MMY) birçok malzeme için uygulandığı ve olumlu sonuçlar verdiği gözükmektedir. Ti6Al4V malzemesi kesme bölgesinde sıcaklık oluşturması sebebiyle en fazla problem yaşanan ve günümüzde savunma, uzay ve biyomedikal sanayiinde kullanımı her geçen gün artan önemli bir malzemedir (Arrazola,2009). Ti6Al4V alaşımı için MMY ile işlenmesi ile ilgili yapılan çalışmalar (Pervaiz,2019) incelendiğinde, işlenebilirliğin artırılması üzerine Ti6Al4V alaşımının tormalanması ile ilgili yapılan çalışmaların çok kısıtlı sayıda olduğu gözükmektedir.(Arrazola et al., 2009 ; Moura et al., 2015)

Kesme bölgesinde oluşan sıcaklığı, kuvveti ve parçanın yüzey pürüzlülüğünü bir arada inceleyerek işlemeyi ayrıntılı olarak analiz eden ve özellikle etki oranlarını araştıran bir çalışmanın uygulayıcılara ve literatüre katkısı olacağı düşünülmektedir.

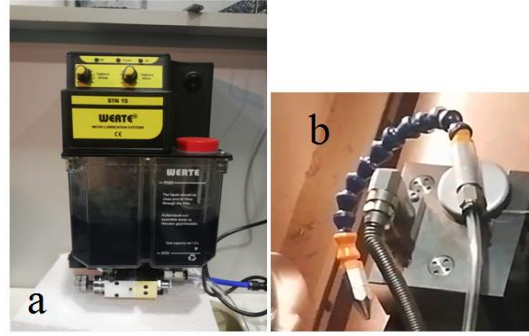
2. Materyal ve Metod

Deneyel çalışmalarda, iş parçalarının tormalanması için Goodway GLS-150 marka CNC tormalama merkezi kullanılmıştır. Uzunluğu 130 mm, çapı ise 30 mm olan Ti-6Al-4V alaşımı işlenmiştir. Tormalama deneyleri, kuru ve MMY yönteminin birbirleriyle kıyaslanabilmesi adına aynı kesme parametreleri ile tekrarlanmıştır. Ti6Al4V alaşımının teknik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Deneylerde işleme uzunluğu 30 mm olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Ti-6Al-4V Teknik Özellikleri

Ti-6Al-4V Bileşenleri (% Ağırlıkça)		Ti-6Al-4V Teknik Özellikleri	
Al	6	Yoğunluk (g/cm ³)	4,43
Fe	Maks. 0,25	Erime Noktası (°C)	1649
O	Maks. 0,2	Isıl İletkenlik (W/mK)	7,2
Ti	90	Elastisite Modülü (GPa)	114
V	4	Maksimum Mukavemet (MPa)	1000
		Akma Mukavemeti (MPa)	880

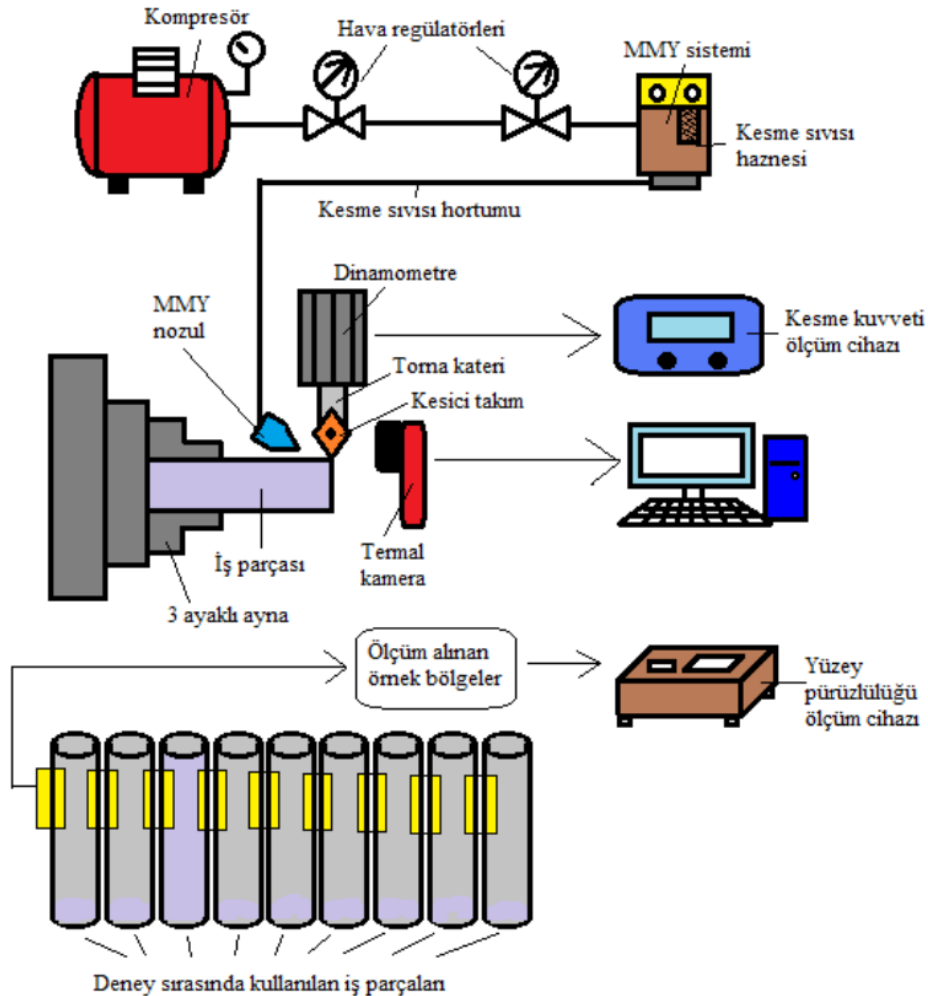
MMY sistemi için Werte Mikro STN 15 marka (Şekil 1) potansiyometre kontrollü pulvarize yağlama sistemi ve nozul ucu kullanılmıştır. Deneylerin yapılması sırasında yağlama aralığı ve yağlama süresi 0,1 sn., hava basıncı da 4 bar olarak belirlenmiştir.



Şekil 1. (a)MMY Sistemi ve (b) MMY Sistemi Nozul Ucu

MMY sisteminde Trim E950 kesme sıvısı kullanılmıştır. Çevreye dostu, yeni yağ teknolojisi ve üst sınıf yağlayıcı katıkların harmanlanmasıyla elde edilmiş bitkisel bazlı metal işleme sıvısıdır. Parlama Noktası konsantre halde 160°C'nin üstündedir. Tipik çalışma aralığı pH değeri 8,8 - 9,4 arasındadır. Kesme sıvısının refraktometre katsayısı 1,0'dır. İş parçasının tornalanmasında Sandvik marka CNMG 12 04 08-SM 1105 kalite PVD TiAlN kaplı kesici uç ve DCLNR 2020K 12 kodlu torna kateri kullanılmıştır. Kesme kuvvetinin ölçülmesi için Kistler marka 9257b model dinamometre kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümleri için Flir marka İ50 model termal kamera kullanılmıştır. Termal kamera doğruluk oranı $\pm\%2$, spektral aralığı 7,5 ila 13 μm ve 2,3 MP kamera çözünürlüğüne sahiptir. Sıcaklık ölçümünde, emisyon 0,8 ve kamera ölçüm aralığı olarak 0-350 °C kullanılmıştır. Yüzey Pürüzlülüğü ölçmek için ise Mitutoyo marka SJ-201 model yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılmıştır.

Deneyde kullanılan tezgah ve ölçüm cihazlarını gösteren deney düzeneği şematik gösterimi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Deney düzeneği şematik gösterimi

Deneylerde işleme parametrelerinin sonuca etkilerinin karşılaştırılması için Tablo 2’de görüldüğü üzere 3 farklı kesme hızı, 3 farklı ilerleme ve 3 farklı kesme derinliği değerleri kullanılmıştır. Kesme hızı 60, 90,120 m/dak, ilerleme 0,05 - 0,15 - 0,25 mm/dev ve kesme derinlikleri 0,5, 1, 1,5 mm olarak belirlenmiştir.

Tablo 2. İşleme parametreleri

PARAMETRELER	SEVİYELER		
	SEVİYE 1	SEVİYE 2	SEVİYE 3
KESME HIZI m/dak	60	90	120
İLERLEME mm/dev	0,05	0,15	0,25
KESME DERİNLİĞİ mm	0,5	1	1,5

Bu parametrelerin hepsi değişerek deney yapıldığında, toplamda her bir işleme yöntemi için 27 deney yapacağından dolayı, hem maliyetten hem de süreden tasarruf edebilmek için Taguchi metodu ortogonal dizisi kullanılmıştır. Taguchi metodunda 3 seviye ve 3 faktör uygulayacağımız için L9 dizisi kullanılmıştır. Bu dizinin faktörleri ve seviyeleri aşağıdaki Tablo 3’de verilmiştir. Bu metod sayesinde 27 deney yerine 9 deney yapılmıştır.

Tablo 3. Deney numaralarının faktörleri ve seviyeleri

DENEY NUMARASI	FAKTÖRLER VE SEVİYELERİ		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Taguchi Metodu ve Varyans Analizi (ANOVA) değerlendirmeleri Minitab uygulaması vasıtasıyla yapılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Ti-6Al-4V alaşımı malzemenin, kuru ve MMY sistemi içerisine konulan ticari bitkisel bazlı kesme sıvısı şartları altında tornalanması esnasında işlenebilirliğin değerlendirilmesi adına kesme kuvveti ve sıcaklık kesme esnasında ve yüzey pürüzlülüğü ise kesme işleminden sonra ölçülmüştür. MMY yöntemi kullanılmasıyla işlenecek bölgeye gönderilen pulvarize kesme sıvısı/hava karışımının etkisiyle ölçülen değerlerde önemli miktarlarda değişiklikler gözlemlenmiştir. Daha sonra bu sonuçlar Minitab uygulamasında değerlendirilmeye alınmıştır. En küçük en iyi yaklaşımı uygulanarak sonuçların sinyal/gürültü oranlarına göre en optimal işleme parametreleri bulunmuştur. Ayrıca hangi işleme parametresinin sonuçlara nasıl etkideği ise varyans analizi ile tespit edilmiştir.

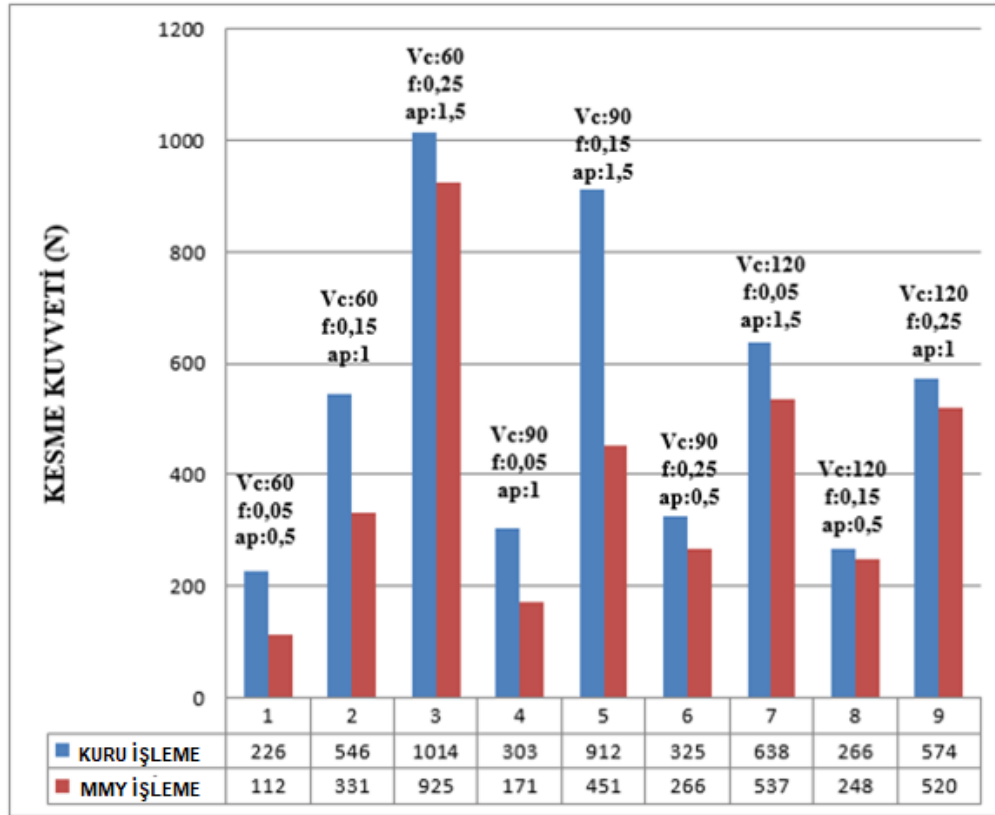
3.1. Kesme Kuvveti

Kuru kesme ve MMY sistemi ile kesme neticesinde elde edilen kesme kuvveti değerleri Tablo 4’te verilmektedir. Tablo 4’te ve Şekil 3’te görüleceği üzere kuru ve MMY ile işleme arasında ki en büyük fark % 50,55 ile 5. deneyde (kesme hızı 90 m/dak, ilerleme 0,15 mm/dev ve kesme derinliği 1,5 mm) olduğu, en az fark ise % 6,77 ile 8. deneyde (kesme hızı 120 m/dak, ilerleme 0,15 mm/dev, kesme derinliği 0,5 mm) olduğu gözlemlenmiştir. Ti6Al4V alaşımının tornalanmasında 1 mm kesme derinliği, 0,20 mm/dev ilerleme ve iki farklı kesme hızı 130 m/dak ve 150 m/dak . yapılan çalışmada bizim bulduğumuz çalışmanın aksine MMY ile yapılan işlemede kesme kuvveti artmıştır (Moura et al., 2015). Başka malzemelerle yapılan diğer araştırmalara bakıldığında bizimle paralel sonuçların elde edildiği görülmektedir. AISI 1040 malzemesinin MMY ile tornalanmasında 0,1 mm/dev ilerleme, 96,7 m/dak kesme hızı ve 1 mm kesme derinliği için kesme kuvvetinde %57,1 azalma olduğu gözlemlenmiştir (Sharma vd., 2016).

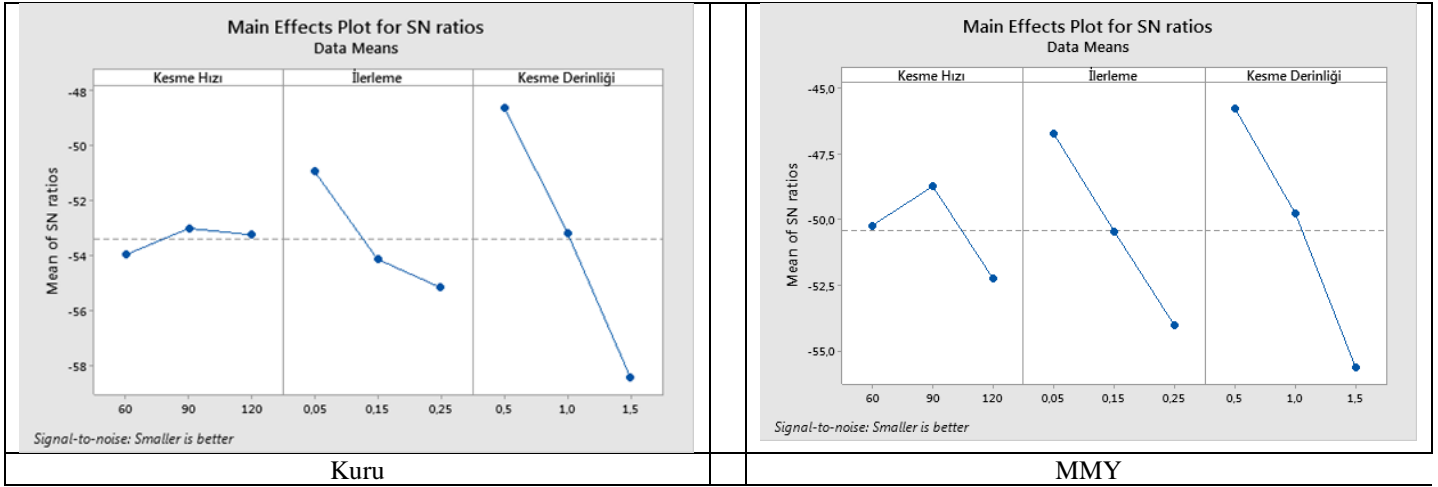
Tablo 4. Kesme Kuvveti Değerleri ve Fark yüzdesi

DENEY NUMARASI	KURU İŞLEME KESME KUVVETİ (N)	MMY İLE İŞLEME KESME KUVVETİ (N)	KESME KUVVETİ FARK ORANLARI (%)
1	226	112	50,44
2	546	331	39,38
3	1014	925	8,78
4	303	171	43,56
5	912	451	50,55
6	325	266	18,15
7	638	537	15,83
8	266	248	6,77
9	574	520	9,41

Kesme kuvveti sonuçlarında ise aşağıdaki Şekil 3'te de görüleceği üzere MMY ile işleme kuru işlemeye kıyasla çok daha düşük sonuçlar vermiştir. Burada dikkat edilecek husus MMY etkisinin işleme parametrelerine göre değişkenlik göstermesidir. MMY ile işlemede düşük işleme değişkenleri değerlerinde en düşük kesme kuvveti açığa çıkmıştır.

**Şekil 1.** Kesme Kuvveti Kıyaslama Grafiği

Taguchi metodunda kuru ve MMY işlemeye göre en küçük en iyi yaklaşımına göre en optimal değerler Şekil 4'te ve Tablo 5'te görüldüğü üzere kuru kesmede kesme hızı 90 m/dak, ilerleme 0,15 mm/dev, kesme derinliğinde ise 0,5 mm olarak sonuçlanmıştır. MMY işleme çalışmalarında Sinyal/Gürültü Oranına göre en optimal değerler kesme hızı 90 m/dak, ilerleme 0,05 mm/dev, kesme derinliği 0,5 mm olarak görülmektedir.



Şekil 2. Kuru ve MMY işlemede Kesme Kuvveti Sinyal/Gürültü Oranı grafiği

Tablo 5. Kuru ve MMY İşlemede Kesme Kuvveti Sinyal/Gürültü oranı

SEVİYE	Kuru Kesme			MMY		
	KESME HIZI	İLERLEME	KESME DERİNLİĞİ	KESME HIZI	İLERLEME	KESME DERİNLİĞİ
1	-53,98	-50,94	-48,61	-50,23	-46,75	-45,79
2	-53,02	-54,15	-53,18	-48,75	-50,46	-49,79
3	-53,26	-55,18	-58,47	-52,27	-54,05	-55,67

ANOVA sonuçlarında (Tablo 6) görüldüğü üzere Ti6Al4V alaşımının kuru işleme deneylerinde en büyük katkının %80,76 ile kesme derinliği, %15,44 ile ilerleme ve %2,72 ile kesme hızı olduğu ve deneylerin güvenilirlik oranı %98,92 olduğu görülmüştür. MMY ile işlemede deneylerinde en büyük katkının %58,83 ile kesme derinliği, %29,37 ile ilerleme ve %2,59 ile kesme hızı olduğu ve deneylerin güvenilirlik oranı %97,41 olduğu görülmüştür. Nouioua vd. (2017) X210Cr12 malzemesi ile yaptıkları benzer çalışmada MMY için kesme derinliğinin etkisini %72,30, ilerlemenin etkisini %21,57 ve kesme hızının etkisini ise %0,31 olarak bulmuşlardır. Bu oranların birbirine yakın olduğunu göstermektedir. Aradaki farkın ise malzeme farkından oluştuğu düşünülmektedir.

Tablo 6. Kuru ve MMY işlemede Kesme Kuvveti için ANOVA Etki Oranları ve güvenilirlik

Parametreler	Kuru İşleme Etki Oranı	MMY İşleme Etki Oranı
İlerleme	15,44%	29,37%
Kesme Derinliği	80,76%	58,83%
Kesme Hızı	2,72%	9,21%
Hata	1,08%	1,08%
Toplam	100,00%	100,00%
Güvenilirlik Oranı	R-sq 98,92%	R-sq 97,41%

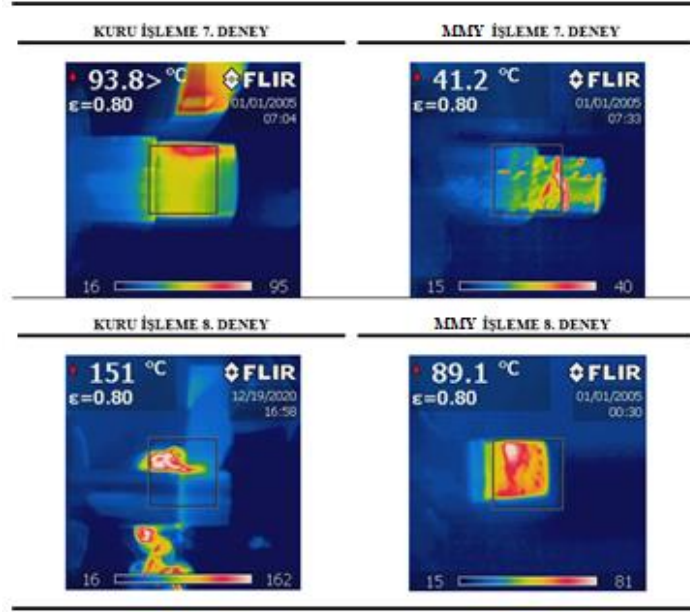
Yapılan deneysel çalışmalarda her iki işleme yönteminin işleme parametrelerinde en optimal değerler kesme hızı 90 m/dak, ilerleme 0,05 mm/dev, kesme derinliği 0,5 mm olduğu görülmüştür. ANOVA sonuçlarında ise kesme derinliği en büyük katkıyı sağlamıştır, kesme derinliğine takiben ilerleme ve kesme hızı izlemiştir. Literatürde de buna paralel sonuçlar bulunmuştur (Nouioua et al., 2017).

ANOVA analizlerinde de görüldüğü üzere kesme kuvvetine en büyük etkinin kesme derinliği olduğu ve bu etkinin kuru işlemede % 80,76 MMY ile işlemede ise % 58,83 oranında olduğu görülmüştür. MMY kullanılmasıyla kesme kuvvetine etki eden işleme parametrelerinin ANOVA etki oranında % 27,15 bir düşüş gözlemlenmiştir.

Burada dikkat edilecek husus, MMY kullanımıyla işleme değişkenlerinin kesme kuvvetine etkilerinin değiştiğinin tespit edilmesidir. Normalde kesme kuvveti hesaplamalarında kullanılan formüllerde kesme bölgesindeki sıcaklıkla ilgili bir parametre bulunmamaktadır.

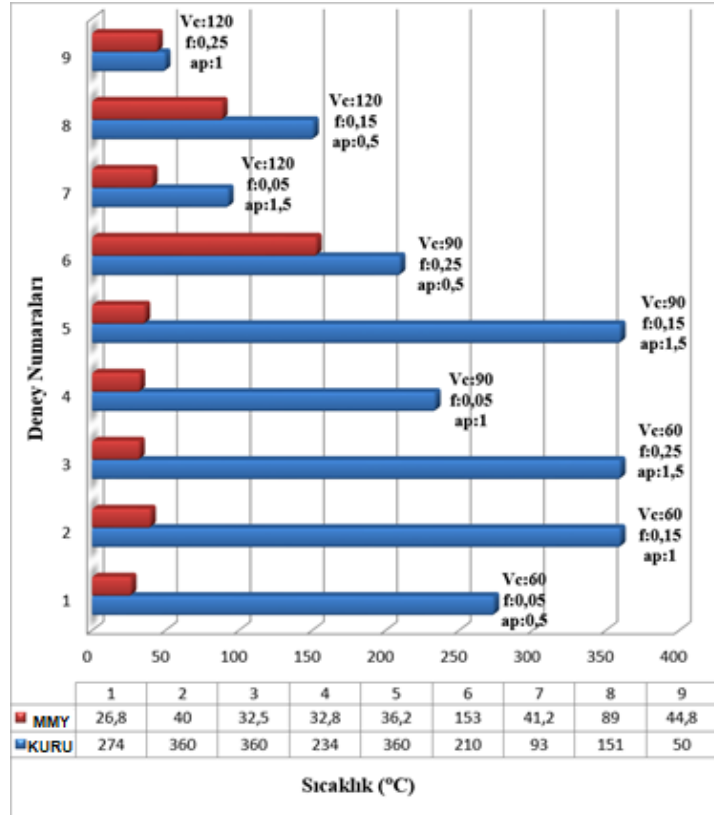
3.2. Sıcaklık

Kuru ve MMY ile işleme yöntemiyle yapılan deneylerde ortaya çıkan sıcaklık değerleri Şekil 5'te görüldüğü üzere termal kamera ile tespit edilmiştir. Aşağıdaki Şekil 5'te kuru ve MMY ile işlemede ortaya çıkan örnek sıcaklık fotoğrafları gösterilmiştir. 7. deneyde % 55,69 oranında değişim, 8. deneyde ise % 41,05 oranında bir değişim gözlemlenmiştir.



Şekil 5. Kuru ve MMY İşlemede Örnek Termal Kamera Fotoğrafları

Kuru ve MMY ile işleme yöntemiyle yapılan deneylerde ortaya çıkan sıcaklık sonuçları Şekil 6'da sıcaklık grafiği şeklinde verilmiştir. Grafikten de görüleceği MMY'e geçildiği zaman sıcaklıklarda ciddi azalma gözlemlenmiştir. Daha sonra daha detaylı yorum yapabilmek için bu sonuçlar Minitab uygulamasında en küçük en iyidir yaklaşımı ile çözümlenmiştir.



Şekil 6. Sıcaklık Grafiği

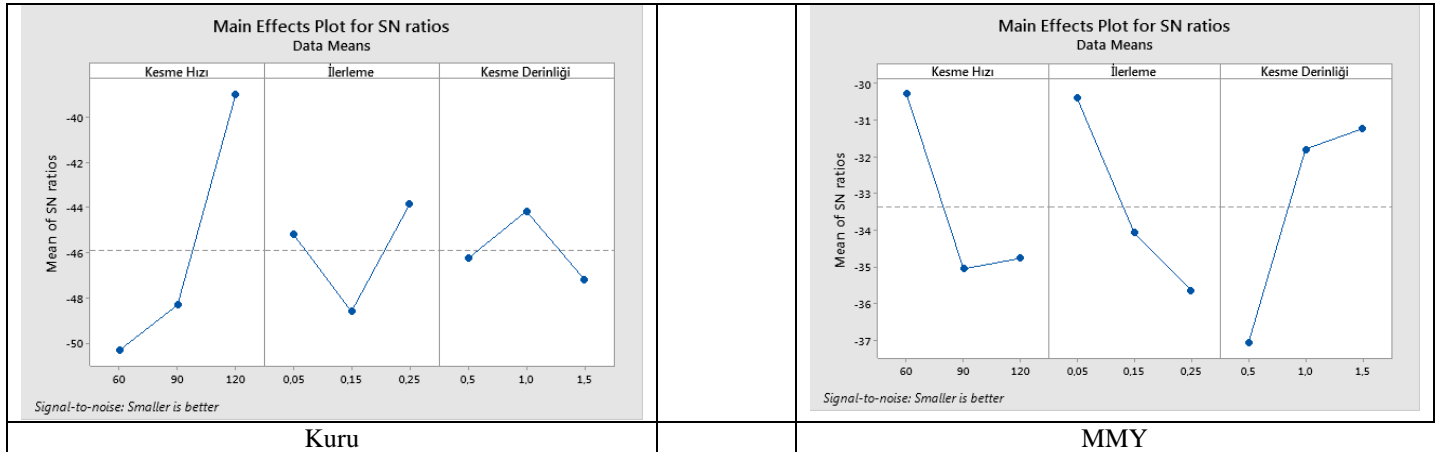
Yapılan deneylerin sonuçlarında elde edilen sıcaklık değerleri ve fark oranları Tablo 7'de verilmiştir. En çok fark 3. deneyde % 90,97 ile en az fark ise 6. deneyde % 27,14 oranında bulunmuştur. Sıcaklıkla ilgili literatürde iki farklı sonuçla karşılaşılmıştır. Birisi kuru kesme ile MMY arasındaki sıcaklık farkının maksimum 50°C olduğunu söylemektedir (Moura et al., 2015). Diğeri ise bizim çalışmamıza benzer olarak % 90 oranında azalmadan söz etmektedir (Hadad & Sadeghi, 2013). Buna ek olarak 2 tip sıcaklık ölçümü söz konusudur. Bunlardan birincisi termal kamera yardımıyla (Rahim et al., 2015), ikincisi ise ısı-çift yardımcıdır (Moura et al., 2015);

Hadad & Sadeghi, 2013). Literatür incelendiğinde ısı çift ile ölçümlerde daha yüksek kesme bölgesi sıcaklığı tespit edildiği görülmektedir. Literatürdeki ısı çifti ile elde edilen değerlerde yanlışlık olduğu düşünülmektedir. Burada bahsedilen sıcaklıklar 100°C'ye ulaşmaktadır ki bu da malzemeler için plastik şekil verme veya operasyon sıcaklıklarının üstündedir.

Tablo 7. Farklı İşlemlerdeki Sıcaklık Sonuçları ve Fark Oranları

DENEY NUMARASI	KURU İŞLEME SICAKLIK (°C)	MMY İLE İŞLEME SICAKLIK (°C)	FARK ORANLARI (%)
1	274	26,8	90,21
2	360	40	88,88
3	360	32,5	90,97
4	234	32,8	85,98
5	360	36,2	89,94
6	210	153	27,14
7	93	41,2	55,69
8	151	89	41,05
9	50	44,8	10,4

Şekil 7'de ve Tablo 8'de görüleceği üzere Minitab uygulamasında yapılan sonuç analizlerinde kuru işleme de sıcaklık için en optimal işleme parametreleri kesme hızı 120 m/dak, ilerleme 0,25 mm/dev, kesme derinliği 1,0 mm olarak belirlenmiştir. MMY ile işleme de sıcaklık için en optimal işleme parametreleri kesme hızı 60 m/dak, ilerleme 0,05 mm/dev, kesme derinliği 1,5 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 7. Kuru ve MMY İşlemede Sıcaklık Sinyal Gürültü Oranı Grafiği

Tablo 8. Kuru ve MMY İşlemede Sıcaklık Sinyal Gürültü Oranı Tablosu

SEVİYE	Kuru Kesme			MMY		
	KESME HIZI	İLERLEME	KESME DERİNLİĞİ	KESME HIZI	İLERLEME	KESME DERİNLİĞİ
1	-50,34	-45,17	-46,26	-30,28	-30,39	-37,08
2	-48,32	-48,61	-44,16	-35,06	-34,07	-31,79
3	-38,98	-43,85	-47,21	-34,77	-35,65	-31,24

Kuru ve MMY işlemedeki sıcaklık değerlerinin Anova sonuçları karşılaştırmalı olarak incelemek için yan yana Tablo 9'da verilmiştir. Kuru kesme için etki oranları kesme hızı için % 79,12, ilerleme için % 13,71 ve kesme derinliği için % 6,07 olarak hesaplanmıştır. Model özetinde yapılan çalışmanın güvenilirlik oranının % 98,90 olduğu belirlenmiştir. MMY ile işlemedeki sıcaklık değerlerinin için etki oranları, kesme hızı için % 19,03, ilerleme için % 20,82 ve kesme derinliği için ise % 39,86 olarak hesaplanmıştır. MMY ile işleme yöntemiyle yapılan deneylerde ortaya çıkan sıcaklık değerlerinin güvenilirlik oranı %79,71 çıkmıştır.

Tablo 9. Kuru ve MMY İşlemede Sıcaklık için ANOVA

Parametreler	Kuru İşleme Etki Oranı	MMY İşleme Etki Oranı
İlerleme	13,71%	20,82%
Kesme Derinliği	6,07%	39,86%
Kesme Hızı	79,12%	19,03%
Hata	1,10%	20,29%

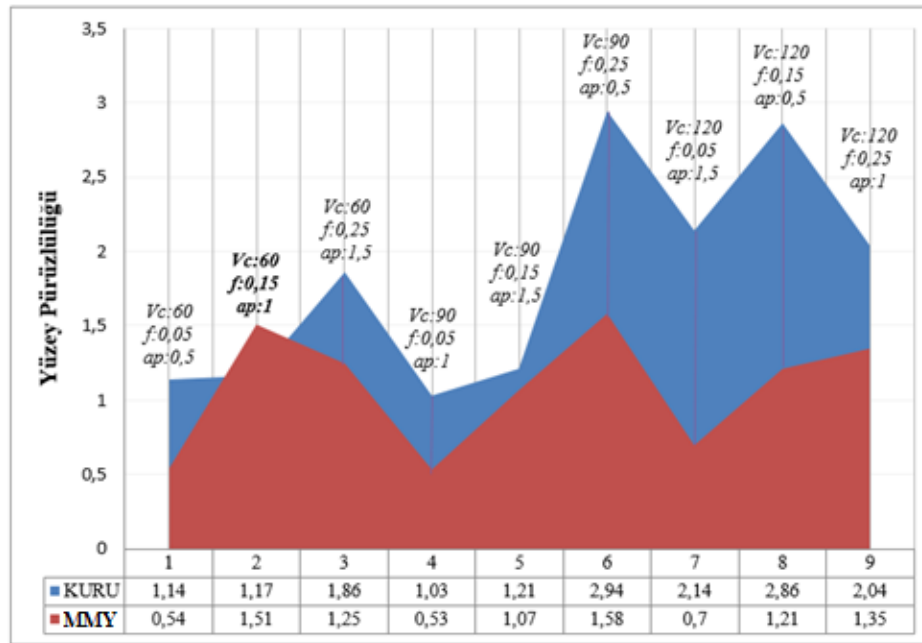
Tablo 9 (devam). Kuru ve MMY İşlemede Sıcaklık için ANOVA

“	Kuru İşleme	MMY İşleme
Parametreler	Etki Oranı	Etki Oranı
Toplam	100,00%	100,00%
Güvenilirlik Oranı	R-sq 98,90%	R-sq 79,71%

Sonuç olarak, MMY kullanımıyla işleme değişkenlerinin sıcaklığa etkilerinin değiştiğinin tespit edilmiştir. Normalde sıcaklık oluşumuna kesme hızı en fazla etki ederken MMY ile işlemede sıcaklığa en fazla kesme derinliğinin etki ettiği görülmektedir.

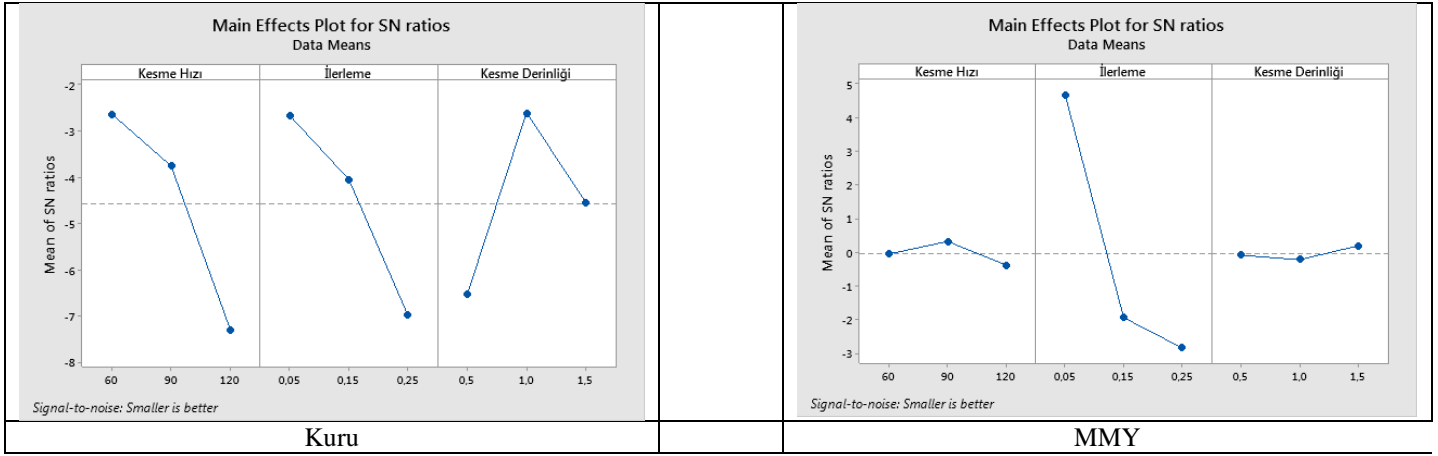
3.3. YüzeY Pürüzlülüğü

Yapılan deneylerin sonuçlarında elde edilen yüzeY pürüzlülük değerleri Şekil 8’de verilmiştir. Kuru kesme ve MMY pürüzlülük değerleri ve kıyaslama oranları Tablo 10’da verilmiştir. En çok fark 7. deneyde % 67,28, en az fark ise 5. deneyde % 11,57 oranında bulunmuştur. Ayrıca 2. deneyde kuru kesme ile daha iyi yüzeY pürüzlülüğü değeri elde edilmiştir. Literatüre bakıldığında kuru kesmede 1,20 ila 1,60 μm arasında değişen yüzeY pürüzlülüğü değerlerinin 0,80 ila 1,10 μm ’ye gerilediği yani benzer oranlarda değişim gözlemlenmektedir.(Gajrani, 2020)

**Şekil 8.** YüzeY Pürüzlülüğü Kıyaslama Grafiği**Tablo 10.** Farklı İşlemelerdeki YüzeY Pürüzlülüğü Sonuçları ve Fark Oranları

DENEY NUMARASI	KURU İŞLEME YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ	MMY İLE İŞLEME YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ	YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ FARK ORANLARI (%)
1	1,14	0,54	52,63
2	1,17	1,51	-29,05
3	1,86	1,25	32,79
4	1,03	0,53	48,54
5	1,21	1,07	11,57
6	2,94	1,58	46,25
7	2,14	0,7	67,28
8	2,86	1,21	57,69
9	2,04	1,35	33,82

Şekil 9 ve Tablo 11’de görüleceği üzere Minitab uygulamasında yapılan sonuç analizlerinde kuru işleme de yüzeY pürüzlülüğü için en optimal işleme parametreleri kesme hızı 60 m/dak, ilerleme 0,05 mm/dev ve kesme derinliği 1,0 mm olarak belirlenmiştir. MMY işlemede yüzeY pürüzlülüğü için en optimal işleme parametreleri ise kesme hızı 90 m/dak, ilerleme 0,05 mm/dev ve kesme derinliği 1,5 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 9. Kuru ve MMY İşlemede Yüzey Pürüzlülüğü Sinyal Gürültü Oranı Grafiği

Tablo 11. Kuru ve MMY İşlemede Yüzey Pürüzlülüğü Sinyal Gürültü Oranı Tablosu

SEVİYE	Kuru Kesme			MMY		
	KESME HIZI	İLERLEME	KESME DERİNLİĞİ	KESME HIZI	İLERLEME	KESME DERİNLİĞİ
1	-2,631	-2,668	-6,544	-0,05520	4,65488	-0,09224
2	-3,760	-4,049	-2,604	0,31789	-1,94097	-0,22391
3	-7,309	-6,983	-4,551	-0,38811	-2,83934	0,19072

Kuru ve MMY işlemedeki yüzey pürüzlülük değerlerinin Anova sonuçlarını incelenmiş ve etki oranları ve güvenilirlik değerleri Tablo 12’de verilmiştir. Kuru kesme için etki oranları kesme hızı için % 32,34, ilerleme için % 24,99 ve kesme derinliği için % 28,54 olarak hesaplanmıştır. Kuru kesme için güvenilirlik oranının % 85,86 olduğu hesaplanmıştır. MMY işlemedeki yüzey pürüzlülük değerlerine etki oranları incelendiğinde kesme hızı için % 0,19, ilerleme için % 86,34 ve kesme derinliği için % 2,03 olarak hesaplandığı görülmektedir. Güvenilirlik oranı ise % 88,57 olarak hesaplanmıştır. AISI 1050 ile yapılan benzer çalışmada (Sarıkaya,2014) yüzey pürüzlülüğüne en fazla etkileyen faktörün %68,8 ile ilerleme olduğu belirtilmiştir. Bu sonuçların benzer ama oranların malzemeden malzemeye değiştiğini göstermektedir.

Tablo 22. Kuru ve MMY İşlemede Yüzey Pürüzlülüğü için ANOVA

Parametreler	Kuru İşleme Etki Oranı	MMY İşleme Etki Oranı
İlerleme	24,99%	86,34%
Kesme Derinliği	28,54%	2,03%
Kesme Hızı	32,34%	0,19%
Hata	14,14%	11,43%
Toplam	100,00%	100,00%
Güvenilirlik Oranı	R-sq 85,86%	R-sq 88,57%

MMY kullanımıyla işleme değişkenlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin değiştiğinin tespit edilmiştir. Burada dikkat edilecek husus, normalde yüzey pürüzlülüğü hesaplamalarında kullanılan formüllerde ilerlemenin etkisinden söz edilmektedir. Burada MMY formüllere uygun bir netice vermesine rağmen kuru işlemede kesme derinliği ve kesme kuvveti neticesinde kesme bölgesinde oluşan sıcaklık neticesinde yüzey pürüzlülüğüne etki eden faktörlerin değiştiği tespit edilmiştir.

4. Sonuçlar

Ti6Al4V Alaşımının tornalanmasında kuru kesme ve bitkisel bazlı MMY ile işleme kesme kuvveti, sıcaklık ve yüzey pürüzlülüğü açısından karşılaştırılması neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- MMY kullanımıyla işleme değişkenlerinin kesme kuvvetine etkilerinin değiştiğinin tespit edilmiştir. Ti6Al4V alaşımının kuru işleme deneylerinde en büyük katkının %80,76 ile kesme derinliği yaparken MMY ile işlemede bu oranın %58,83’ e gerilediği

görülmektedir. İlerlemenin etkisi ise MMY sayesinde %15,44'ten %29,37'ye yükselmiştir. Kesme hızı değişiminin fazla bir etkisi olmadığı görülmüştür.

- Deneyleerde kullanılan kesme sıvısının, iş parçası ve kesici takım arasına iyi bir şekilde nüfuz ettiğinden yani ıslatma özelliğinden dolayı kesme kuvvetinin %50,55'e varan oranlarda düştüğü görülmektedir.
- Yüksek kesme derinliği değerlerinde sıcaklığın çok yükseldiği ve MMY'nin sıcaklık düşme oranına daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Kesme sıvısının yağlayıcı özelliği sayesinde sürtünme kuvvetini azalttığı için işleme esnasında ortaya çıkan ısının azaldığı ve buna ek olarak MMY sisteminde bulunan basınçlı havanın talaşı uzaklaştırma fonksiyonunun da, ısının büyük bir kısmının talaşla birlikte atılmasının da katkı sağladığı görülmektedir.
- Kuru kesmede sıcaklık oluşumuna %79,12 kesme hızı en fazla etki ederken MMY ile işlemede sıcaklığa en fazla %39,86 ile kesme derinliğinin etki ettiği görülmektedir.
- Kesme derinliği ve kesme hızlarının yüksek olduğu durumlarda sıcaklığa etkileri artmakta bu da yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilemektedir. MMY kullanılan durumlarda ise sıcaklık normal değerlere düşmekte ve beklenildiği gibi yüzey pürüzlülüğüne en fazla etkiyi % 86,34 ile ilerleme göstermektedir.
- MMY sistemi sayesinde sürdürülebilirlik açısından geleneksel kesme sıvısını kullanımı saatte 1000 l/sa iken MMY sistemi sayesinde bu sıvı tüketimi 25 ml/sa tüketimine düşürülmüştür ve bu duruma ek olarak iş parçasının üzerine geleneksel işleme yöntemleri gibi sıvı fazla miktarda sıvı püskürtülmediği için iş parçasını kurutma işlemine tabii tutulmasına gerek kalmamıştır.
- ANOVA etki oranlarındaki kıyaslama tablolarındaki işleme parametrelerinin etki oranlarındaki değişiminin, kesme kuvveti ve sıcaklıkta herhangi bir ölçümü değiştirmek için tek bir parametreyi değiştirip optimal skalayı yakalamaya çalışmak yerine kesme sıvısı sayesinde bütün işleme parametrelerini değiştirip daha çok kombinasyon yapıp daha etkili sonuçlar yakalanabileceği, yüzey pürüzlülüğünde ise bu durumun tam tersi olup sadece ilerlemeyi değiştirmenin daha etkili olacağı düşünülmektedir.
- MMY kullanımıyla işleme değişkenlerinin kesme kuvvetine, sıcaklığa ve yüzey pürüzlülüğüne olan etkilerinin değiştiği tespit edilmiş olup hesaplamalarda kullanılan formüllerin kullanılmasında, kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın veya soğutmanın da hesaba katılması gerekmektedir.

Teşekkür/Bilgilendirme

Bu çalışma 2020/053 nolu proje numarası ile Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. Kırıkkale, Türkiye.

Kaynakça

Arrazola, P. J., Garay, A., Iriarte, L. M., Armendia, M., Marya, S., & Le Maître, F. (2009). Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555. 3). *Journal of materials processing technology*, 209(5), 2223-2230.

Basmacı, G. (2012). Tornalamada minimum miktarda yağlama (MMY) tekniğinin takım ve iş parçası üzerine etkilerinin incelenmesi. Yüksek Öğretim Kurulu Başkanlığı, Tez Merkezi. 320540

Ekinovic, S., Prcanovic, H., Begovic, E. (2015). Investigation of Influence of MQL Machining Parameters on Cutting Forces During MQL Turning of Carbon Steel St52-3. [Procedia Engineering](#), 132, 608-614

Elbah, M., Laouici, H., Benlahmidi, S., Nouioua, M. Yaltese, M. A. (2019). Comparative assessment of machining environments (dry, wet and MQL) in hard turning of AISI 4140 steel with CC6050 tools. [The International Journal of Advanced Manufacturing Technology](#), 105, 2581–2597.

Fratila, D. (2010). Macro-level environmental comparison of near-dry machining and flood machining. *Journal of Cleaner Production*, 18, 1031-1039.

Gajrani, K. K. (2020). Assessment of cryo-MQL environment for machining of Ti-6Al-4V. *Journal of Manufacturing Processes*, 60, 494-502.

Hadad, M., Sadeghi, B. (2013). Minimum quantity lubrication-MQL turning of AISI 4140 steel alloy. *Journal of Cleaner Production*, 54, 332-343.

Khan, M. M. A., Mithu, M. A. H., Dhar, N. R. (2009). Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid. [Journal of Materials Processing Technology](#), 209, 5573-5583.

Marques, A., Guimaraes, C., Batista, R. B., Fonseca, M. P. C., Sales, W. F., Machado, A. R. (2016). Surface Integrity Analysis of Inconel 718 after Turning with Different Solid Lubricants Dispersed in Neat Oil Delivered by MMY. *Procedia Manufacturing*, 5, 609-620.

Meena, A., Mansori, M. E. (2011). Study of dry and minimum quantity lubrication drilling of novel austempered ductile iron (ADI) for automotive applications. *Wear*, 271, 2412-2416.

- Moura, R. R., Silva, M. B., Machado, A. R., Sales, W. F. (2015). The effect of application of cutting fluid with solid lubricant in suspension during cutting of Ti-6Al-4V alloy. *Wear*, 332-333, 762-771.
- Nouioua, M., Yallese, M. A., Khettabi, R., Belhadi, S., Bouhalais, M. L., & Girardin, F. (2017). Investigation of the performance of the MQL, dry, and wet turning by response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(5), 2485-2504.
- Pervaiz, S., Anwar, S., Qureshi, I., & Ahmed, N. (2019). Recent advances in the machining of titanium alloys using minimum quantity lubrication (MQL) based techniques. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 6(1), 133-145.
- Rahim, E. A., İbrahim, M. R., Rahim, A. A., Aziz, S., Mohid, Z. (2015). Experimental Investigation of Minimum Quantity Lubrication (MQL) as a Sustainable Cooling Technique. *Procedia CIRP*, 26, 351-354.
- Sarıkaya, M., & Güllü, A. (2014). Taguchi design and response surface methodology based analysis of machining parameters in CNC turning under MQL. *Journal of Cleaner Production*, 65, 604-616.
- Sharma, A. K., Singh, R. K., Dixit, A. R., & Tiwari, A. K. (2016). Characterization and experimental investigation of Al₂O₃ nanoparticle based cutting fluid in turning of AISI 1040 steel under minimum quantity lubrication (MQL). *Materials Today: Proceedings*, 3(6), 1899-1906.
- Yücel, A., & Yıldırım, Ç. V. AA2024 Alaşımının Tornalanmasında Nanoakışkan Konsantrasyon Oranı ve MMY Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Sıcaklığı Üzerindeki Etkisi. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 1(3), 18-32.



Üniversal Motorun Yumuşak Manyetik Kompozit-Amorf ve M19 Malzemeleriyle Oluşturulmuş Nüve Formlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi Analizi ile Performans Karşılaştırması

Performance Comparison of Universal Motor Under Different Core Materials Soft Magnetic Composites-Amorphous and M19 Using with Finite Element Method Analysis

İsmail Topaloğlu¹

¹Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Çankırı Karatekin Üniversitesi, 18100 Çankırı, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 24/12/2020

Kabul / Accepted: 05/05/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 18/06/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Üniversal motorlar geniş kullanım alanına hitap etmesi bakımından popüler olmasına karşın verimleri sınırlıdır. Son yıllarda malzeme biliminin gelişmesiyle birlikte elektrik makinalarının boyut ve performanslarında önemli değişimler olmuştur. Bu çalışmada üniversal motorun, stator nüve materyalinin YMK (yumuşak manyetik kompozit), amorf ve M19, rotor nüve materyalinin amorf, M19 ve YMK kullanılması durumunda motorda meydana gelen nüve kayıpları analitik ve sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenmiştir. Üniversal motor için elektromanyetik tork değişimi, demir kaybı, bakır kaybı, verimi ve ağırlık değişimi sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Stator nüve formlarının M19 ve rotor nüve formunun amorf olması durumunda maksimum verim ve minimum kaybın olduğu gözlemlenmiştir. M19 malzemelerinden oluşan konfigürasyonda ise amorf yapıya benzer performans değerleri elde edilmiştir. Böylece üniversal motorda kullanılacak en iyi nüve materyali belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Amorf, M19, YMK, üniversal motor, SEA”

Abstract

Although efficiency is limited popular in terms of universal motors has wide range of applications. The size and performance of electrical equipment with the development of materials science in recent years have been significant changes. In this study, the universal motor, the stator core material SMC (soft magnetic composites), Amorphous and M19, the rotor core material is Amorphous, M19 and core losses occurring in the motor when using the SMC was determined by analytical and finite element method. For universal motor electromagnetic torque variation, iron loss, copper loss, efficiency and weight change were examined. If the stator core from M19 and rotor core form amorphous was observed that maximum efficiency and minimum loss occurs. In the configuration of M19 material was obtained similar performance value with amorphous structure. Thus it was determined the best core material can be used in universal motor.

Key Words

“Amorf, M19, SMC, Universal motor, FEA”

1. Giriş

Elektrik makineleri bilindiği gibi elektrik enerjisini mekanik enerjiye(motor) veya mekanik enerjiyi elektrik enerjisine (jeneratör) dönüştüren makineler olduğundan dolayı elektrik kayıplarına ek olarak mekanik kayıplarda söz konusudur. Bu enerji dönüşümlerinin en az enerji kaybı ile gerçekleşmesi istenir. Bu sebepten dolayı elektrik makina tasarımlarının maksimum verim değerlerini verecek şekilde yapılması gerekir. Bu makinelerin çalışma prensipleri yıllardır değişmemesine rağmen kullanılan materyallerin değişimiyle performanslarında önemli ölçüde değişiklikler olmuştur.

Demir alaşımli nüve materyalinin (Amorf, nanocastline) gelişmesi; büyük güçte küçük ebatlı elektrik makinelerin tasarımı ve uygulamalarını artırmıştır. Amorf materyali motor ve transformatör uygulamalarında %70 oranında kayıplarda azalış göstermektedir. Önceki yapılan çalışmalarda Johnson ve Bailey (2020) yaptıkları çalışmada amorf malzemenin motor ve transformatörlerde kayıplarını incelemiştir. Mischler (2018), 60Hz frekansta Amorf nüveli ve M22 silisli saç malzemeli iki asenkron motoru kayıplar açısından incelemiştir, Jianwei ve Ting (2010), yapmış oldukları çalışmada klasik ve Amorf nüveli asenkron motoru 50-60-100 Hz frekanslardaki çalışmalarını Ansoft-Maxwell kullanarak kayıplar açısından değerlendirmiştir. 7.5 KW'lık M19 ve Amorf nüve materyali üç fazlı asenkron motorun v/f kontrolü sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak performansını incelenmiştir. Makinanın toplam ağırlığında %10 küçülme çalışma frekansı arttıkça amorf nüveli asenkron motorun daha iyi performans gösterdiğini bulmuştur. Dems ve Komez (2014), amorf nüveli asenkron motorun uygulamasını gerçekleştirmişler frekans attıkça kayıplarının azaldığını göstermişlerdir.

Bir fazlı transformatörlerde amorf nüvenin kullanılması klasik çelik nüveli transformatörlere nazaran daha iyi performans göstermiştir. Ayrıca, şebeke frekanslı ve orta frekanslı dağıtım trafolarında amorf nüvenin kullanılması tanecikleri yönlendirilmiş çelik nüveli trafolarla nazaran çok daha avantajlıdır. Bir fazlı trafolarında ortalama %62,1, üç fazlı trafolarında ise ortalama 67.6 demir kayıplarını azaltmaktadır. 60 Hz frekanslı transformatör uygulamasında, manyetik akı yoğunluğu 1.3 Tesla üzerinde amorf nüveler M3 çeliklere nazaran işitilebilir ses seviyesi yüksektir.

Amorf nüve malzemesinin kullanımı balastlarda %10 kadar kayıpları önemli ölçüde azaltacaktır. Alternatif akım ateşleme bobini sistemlerinde kullanımını artıracaktır. Yüksek hızlı motor-jeneratör uygulamalarında amorf materyali kullanımı uygundur. Wang (2011) rotor ferrit mıknatıslı, stator amorf nüveli eksenel akılı motor tasarımı ve uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma sonucunda verim %90 ve motor boyutunu önemli ölçüde küçültmüşlerdir.

Geleneksel makineler ile karşılaştırıldığında Amorf makineler, boyutlarının küçülmesi, yüksek frekanslarda çalışması, verim ve güç faktörlerinde iyileşme gibi avantajlara sahiptir. Ayrıca nüve materyalinin pahalı olması ve radyal yapılı motor/jeneratör geometrilerinin üretiminde kullanılması karmaşıktır. Bu nedenle daha çok transformatör uygulamalarında kullanılmaktadır.

Yapılan çalışmalar göstermektedir ki elektrik makinelerinin 1-20 KHz uygulamalarında diğer yumuşak manyetik malzemelere nazaran kayıpları büyük oranda azaltmaktadır. Ayrıca, yüksek frekanslardaki kayıplarının az olması nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının (rüzgâr, güneş) üretim alanlarında yaygın olarak kullanılması beklenmektedir. Fiyatlarının diğer malzemelere nazaran daha pahalı olması iyileştirile bilirse bu malzemeye olan talebi arttırması beklenmektedir.

Zhou ve ark. (1999) Ansoft Maxwell programı kullanarak manyetik alan- devre ve hareket eşitlikleri birleştirerek üniversal motorun dinamik benzetimini gerçekleştirmişlerdir. Kim, Jack ve Cros ve ark.,(2000-2006) yeni yapılı üniversal motorların statorlarında SMC malzemenin kullanılması ile klasik silisli saçlı motorlara nazaran daha avantajlı (bobin tasarrufu, eksenel uzunluğu azaltması) olduğunu belirtmişlerdir.

Bu çalışmada üniversal motorun verimlerini arttırmaya yönelik düşük kayıplı nüve materyali (Amorf) kullanılmıştır. M19, YMK ve Amorf nüveli makine, kayıplar açısından incelenmiştir. Ayrıca bu makinelerin genel dinamik parametreleri değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Amorf (metalik camlı) alaşımlar, sıvı haldeki metallerin ani olarak soğutulmasıyla normal kristallerin sahip olduğu atomik düzenin ve kristal yapının kaybolmasından meydana gelirler. Amorf alaşımli nüveler 1960lı yıllardan günümüze kadar bilinmesine karşın fiyatlarının yüksek olması nedeniyle kullanım alanları sınırlı kalmıştır. Düşük kayıplı ve yüksek manyetik akı yoğunluğuna sahip yeni amorf metallerine yönelik deneysel çalışmalar devam etmektedir.

Amorf metali %92 Fe,%5Si ve %3B içeren bir alaşımdır. Silisyum çelik malzemeler ise %97 Fe ve %3 Si dan oluşan bir alaşımdır. Bilindiği gibi malzemelerde demir alaşım oranının artması yüksek manyetik akı yoğunluğuna, silisyum oranının artması nüve direncinin ve kırılgenliğinin artmasına neden olmaktadır. Amorf malzemeler silisyum çelik malzemelere nazaran yaklaşık on kat daha incedir. Ayrıca, düşük paketleme faktörüne ve yüksek gerinim-gerilme değerine sahiptir. YMK malzemeler silisli çelik malzemelere nazaran düşük geçirgenlik ve akı yoğunluğuna sahiptir. YMK nüve yapısı ile kullanılması imalat kolaylığı sağlaması ve düzgün ısı dağılımı için önemlidir. Nüve malzemesinin özelliğini belirleyen parametreler; manyetik geçirgenlik, doyum noktası, kalıcı mıknatısiyet, elektriksel direnç ve koersivitesi şeklinde sıralanabilir. Bu çalışmada kullanılan M19, Amorf, Samaloy 700 1P nüve materyalinin özellikleri **Tablo 1**'de verilmiştir:

Tablo 1. Amorf, YMK ve M19 malzeme özellikleri

Malzeme Özellikleri	Birim	Amorf	M19	YMK (Somaloy 700 1P)	
Özgül ağırlık	kg / m^3	7180	7650	7450	
Özgül direnç	$\mu\Omega m$	1,30	0,52	400	
Doyma indüksiyonu	T	1,56	1,8	1,56-(10000 A/m)	
Nüve kayıp	k_h	125,167	164,2	682,565	
Katsayıları	k_c	W/m ³	0,00235968	1,41304	0,255412
	k_e		0,534436	1,79322	4,17571
Kalınlık	mm	0,023	0,23	Katı	

Buradaki nüve kayıp katsayıları üretici firmaların vermiş olduğu çeşitli frekanslardaki (B-P) grafiğinden elde edilmiştir.

3. Üniversal Motorun Analiz Eşitlikleri

Universal motor performansı frekans domeninde analiz edilecek olursa motor gerilim denklemi eşitlik 1 deki gibi ifade edilebilir:

$$U = ZI = (R_a + R_f + R_b)I + j\omega(L_a + L_f + 2M_{af})I + \omega_e(G_{aa} + G_{af})I \quad (1)$$

burada, R_a , R_f , ve R_b sırasıyla armatür direnci, alan sargısı direnci ve fırça temas direncidir. L_a , L_f , ve M_{af} sırasıyla armatür öz indüktansı, alan sargısı öz indüktansı, ve ortak indüktanstır. Lineerleştirilmiş nonlinear parametreler olan G_{aa} ve G_{af} sırasıyla armatür alan sargılarından indüklenen gerilim hareket katsayısı ve alan sargısı akımlarıdır. Ayrıca diğer Lineerleştirilmiş nonlinear parametreler olan ω radyan frekans ve ω_e rotor hızıdır rad/s. Z eşdeğer giriş empedansı. Fırça eksenini q-ekseni ile aynı hizaya olduğunda eşitlik 2 durumu oluşur.

$$M_{af} = G_{aa} = 0 \quad (2)$$

Verilen rotor hızı ω_e , armatür akımı uygulanan gerilime bağlı olarak hesaplanabilir, eşitlik 3 de bu durum verilmiştir;

$$I = \frac{U}{Z} \quad (3)$$

Sinüzoidal akı altında nüvede oluşan kayıplar Eşitlik 4'de verilmiştir:

$$P_v = P_h + P_c + P_e + P_a \quad (4)$$

P_h histerezis kayıpları, P_c girdap kayıpları, P_e ilave girdap kayıpları olarak ifade edilir. Bu kayıplar Eşitlik 5, 6 ve 7'de görülebilir;

$$P_h = k_h f B_m^2 \quad (5)$$

$$P_c = k_c (f B_m)^2 \quad (6)$$

$$P_e = k_e (f B_m)^{1,5} \quad (7)$$

Anormal kayıplar P_a olarak ifade edilmektedir. Bu kayıplar Williams ve ark. tarafından “*materyal üzerindeki geçirgenliğin homojen dağılmaması*”, olarak ifade edilmiştir. Bu kayıpları domain duvar hareketinde; problemler veya girdap kayıplarının gerçekleşmesinden kaynaklandığı söylenebilir. Bu kayıplar uygulamada meydana gelen anormal kayıp olduğu için bu çalışmada ihmal edilmiştir.

Nüve kayıpları genel olarak;

$$P_v = k_h f B_m^2 + k_c (f B_m)^2 + k_e (f B_m)^{1.5} \quad (8)$$

Eşitlik 8'de k_h , histerezis kayıp katsayısı, k_c , girdap akımları kayıp katsayısı, k_e ilave girdap nüve kayıp katsayısıdır.

Nüve malzemesine ait kayıp katsayıları verilen B-P grafiğinden bulunabilir. Nüve malzemesi üreten firmalar genellikle frekansa bağlı olarak kayıp eğrisini vermektedir. f test edilen frekans olmak üzere, birden fazla frekans değerlerine ait B-P grafiğinden yararlanılırsa, kaybedilen gücü hesaplamak için gerekli olan nüve katsayıları yapısı kare formda yine minimize edilerek hesaplanmaktadır. Ayrıca her bir orijinal P-B eğrisine eğri uydurularak yakınsanmakta ve hata ölçütü (err) minimize ederek çalışma frekansındaki katsayıları uygun değer hesaplanmaktadır:

$$err(k_h, k_c, k_e) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \left[P_{vij} - (k_h f_i B_{mij}^2 + k_c f_i^2 B_{mij}^2 + k_e f_i^{1.5} B_{mij}^{1.5}) \right]^2 = \min \quad (9)$$

m kayıp eğri sayısı, n_i i 'nci kayıp eğrisindeki nokta sayısı olarak verilir.

Üniversal motorun verimi çıkış gücün giriş güce oranı şeklinde bulunur (Eşitlik 12). Verimi etkileyen temel faktörler kayıplardır. Burada, Eşitlik 11 ve 12'de P_{out} çıkış gücü, P_{in} giriş gücü, P_{cu} rotor ve statorda meydana gelen bakır kaybı toplamı, P_{fe} stator ve rotorda meydana gelen demir kayıpları toplamı (girdap ve histerezis), P_{wfr} sürtünme ve rüzgâr kayıpları toplamı, P_{wfr} referans sürtünme kayıp, $n_{reference}$ referans hız, n_{rated} anma hızı P_{brush} fırçada meydana gelen kayıpların toplamı olarak verilmiştir. Giriş gücü direkt olarak akım ve gerilimden hesaplanabilir (Eşitlik 10).

$$P_{in} = UI \cos \phi \quad (10)$$

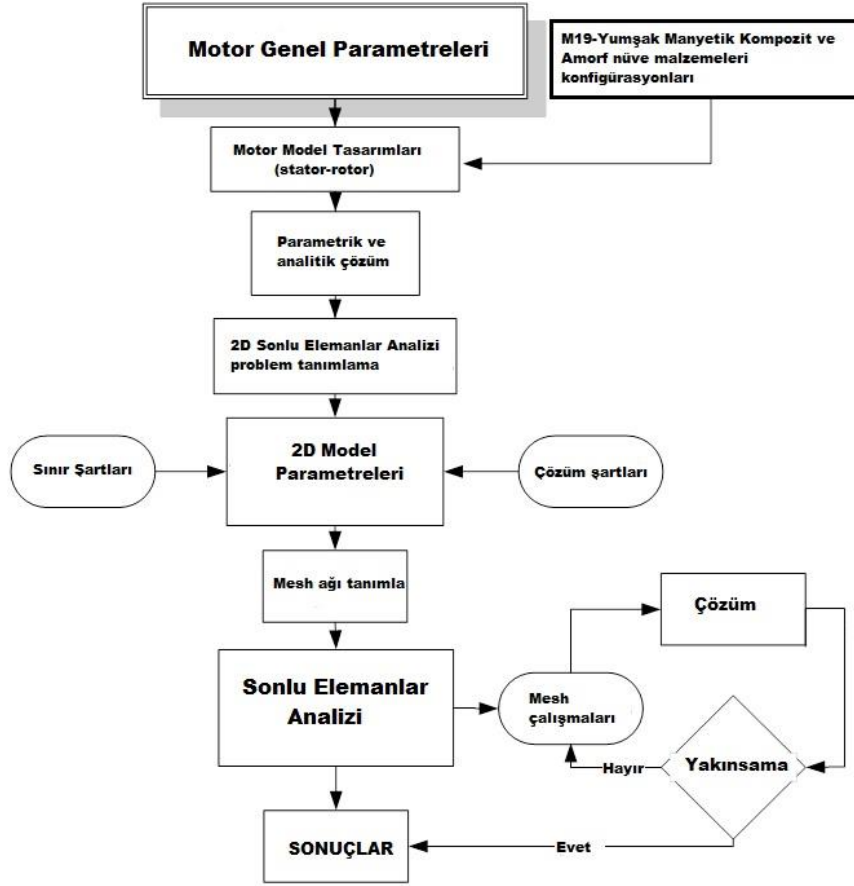
$$P_{wf} = P_{wfr} \frac{n_{reference}}{n_{rated}} \quad (11)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{cu} - P_{fe} - P_{wf} - P_{brush}}{P_{in}} \quad (12)$$

4. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analiz

Ansys Maxwell, dinamik (zamanla değişen) ve statik durum analizi ile ilgili elektrik problemlerinin elektromanyetik analizini yapmak için tasarımcılar tarafından kullanılan 2 ve 3 boyutlu (2D/3D) sonlu elemanlar analizi yazılımıdır.

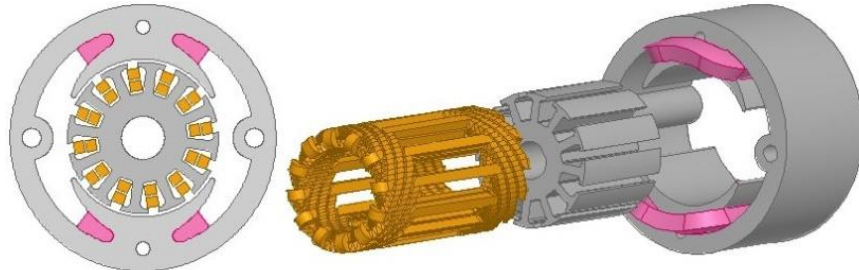
Modellemeye bakış açısından, elektrik makineleri temelde 3 boyutlu bir geometriye sahiptir. Rmxprt modülünde (Bir/üç fazlı asenkron motor/jeneratör, senkron motor/jeneratör, sürekli mıknatıslı motor/jeneratör, pençe tipi alternatör, anahtarlamalı relüktans motor, hat başlamalı sürekli mıknatıslı senkron motor, fırçasız da motor, da motor, üniversal motor, eksenel akılı motor/jeneratör) tasarlanan asenkron motor ve radyal akılı jeneratör, iki nüve materyali (M19, Amorf ve SMC) için analitik çözümler gerçekleştirilir ve sonlu eleman çözümleri için model parametreleri hazır hale gelir. Rmxprt'de hesaplanan çözümler analitiktir. Bu nedenle sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak kayıplar karşılaştırılmıştır. **Şekil 1**'de görüldüğü gibi model parametreleri olarak; sınır şartları, bobinden geçen akım değeri veya dış devreden çalışma şartları (Maxwell Circuit Editor) aktarılır. Böylece tasarlanan sistem analize hazır hale getirilir. Mesh tanımlama, program algoritmasında küçük gibi görünse de makinanın yeterli çözüm vermesi için çok önemlidir. Analiz algoritmasına göre öncelikle modellenecek sistem üçgen şeklinde elemanlara bölünür ve sonlu elemanlara ağı oluşturulur. Çözüm sürecinde iterasyonlarla ağlar iyileştirilerek hata azaltılır. İki boyutlu sonlu eleman ağlarla geçici hal analizleri gerçekleştirilir.



Şekil 1. SEY Analiz Diyagramı

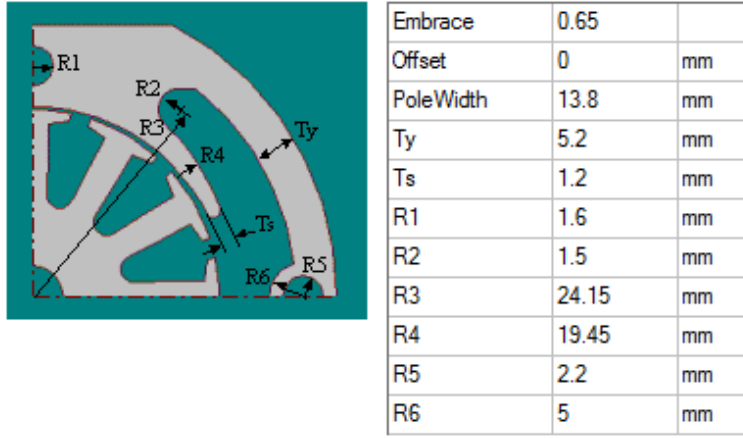
Tablo 2. Makinaların genel parametreleri

Motor Parametreleri		Stator Parametreleri		Rotor Parametreleri	
Çıkış Gücü (kW)	0,1	Dış çap (mm)	61,7	Rotor oluk sayısı	12
Gerilim (V)	120	Stator uzunluğu (mm)	33,35	Rotor dış çapı (mm)	35
Frekans (Hz)	50	Kutup genişliği (mm)	13,8	Rotor iç çapı (mm)	10
Kutup Sayısı	2	Kutup başına bobin dönüşü	145	Tek Alan sargısı	47
Hız (rpm)	12400	Alan sargısı direnci (ohm)	3,6161	Armatür sargısı direnci (ohm)	3,9244
Sürtünme kayıpları (W)	10	Kaçak endüktans (mH)	15,453	Armatür kaçak endüktans(mH)	4,4833
Çalışma Sıcaklığı	75	Öz-endüktans (mH)	97,447	Armatür öz-endüktans (mH)	18,488



(a)

Şekil 2. (a) Üniversal motor 2D/3D görünümü, (b) Stator-Rotor geometrik parametre değerleri



(b)

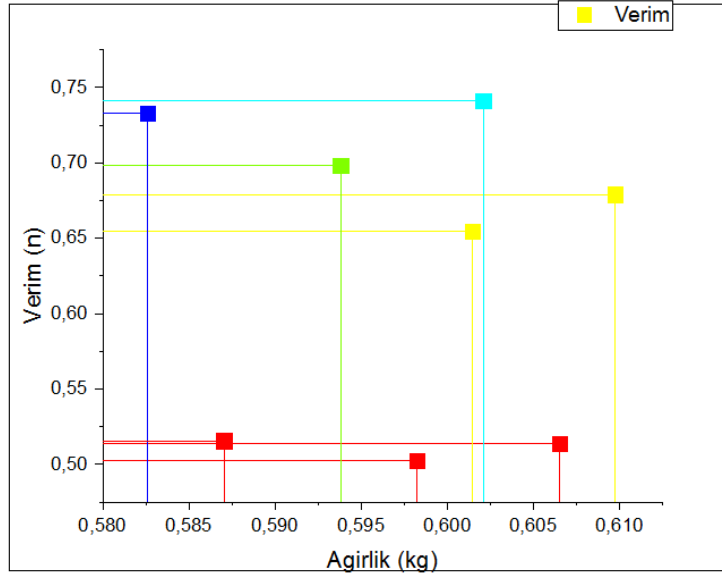
Şekil 2 (devam). (a) Üniversal motor 2D/3D görünümü, (b) Stator-Rotor geometrik parametre değerleri

Şekil ikideki başlangıç tasarımından motor geometrik verileri elde edilmiştir. Sonrasında bu değerler Ansoft Rmxprt ile derlenerek motor genel boyut bilgileri elde edilmiştir. Şekil 2 a'da tasarlanan motorun iki ve üç boyutlu görüntüleri verilmiştir. Şekilde rotor sargıları, rotor, alan sargıları ve stator ayrı ayrı gösterilmiştir. Bindirme (Lap) sargısı için çarpım sayısı bir sarımın başından sonuna aradaki komütatör sayısına eşittir. Paralel kol sayısı da sargı çarpım sayısı ile kutup sayısının çarpımından elde edilir. Bu tasarımda çarpım sayısı bir ve paralel kol sayısı ikidir.

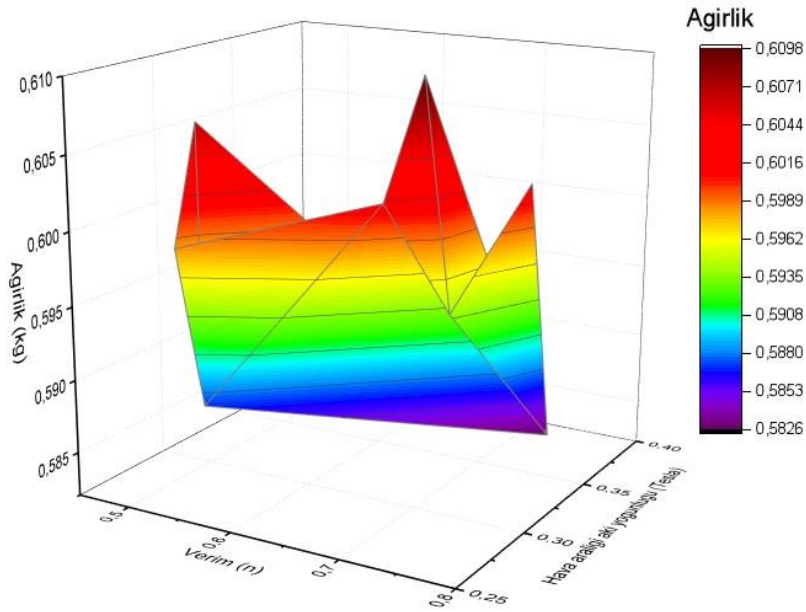
Tablo 3. Stator-Rotor yapısına göre üniversal motorun ağırlık, verim, hız, tork, hava aralığı akı yoğunluğu açısından karşılaştırılmaları

Stator Malzeme	M19-	M19-	M19-	YMK -	YMK -	YMK -	Amorf-	Amorf-	Amorf-
Rotor Malzeme	M19	YMK	Amorf	YMK	M19	Amorf	Amorf	YMK	M19
Toplam ağırlık (kg)	0,609756	0,60649	0,60208	0,59821	0,601476	0,5938	0,582622	0,587032	0,590298
Verim (%)	67,9089	51,3482	74,1125	50,279	65,484	69,8271	73,3163	51,5707	67,5182
Hız (rpm)	18604,5	20486,3	16809,8	20643,3	18727,8	17819,4	15556,6	20523,4	18396,9
Tork (N.m)	0,0510923	0,0465162	0,056619	0,0462153	0,0509159	0,0534935	0,0613341	0,0464659	0,051763
Hava aralığı akı yoğunluğu (T)	0,322146	0,286824	0,353463	0,279382	0,312114	0,327117	0,380687	0,287703	0,326646

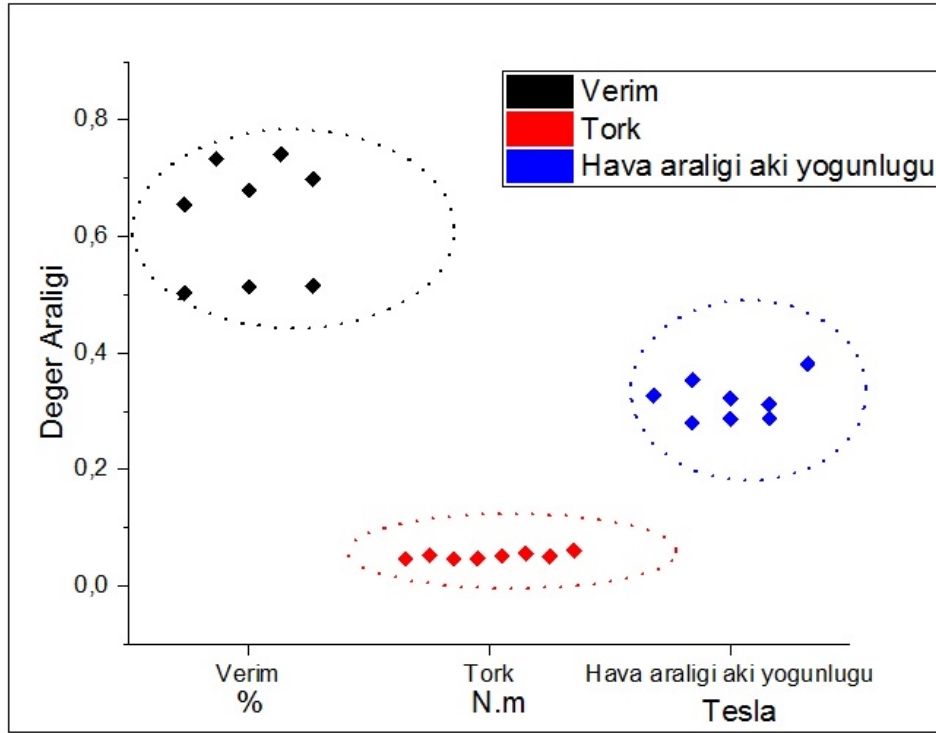
Tablo 3'de görüldüğü gibi stator ve rotor materyalinin değişimine göre üniversal motorların ağırlık, verim ve tork açısından değerleri değişmektedir. Analitik olarak incelendiğinde m1 maksimum verim noktaları olmak üzere hız-verim grafiği (Şekil 6), hız-tork grafiği (Şekil 7) ve alan sargısından geçen akım (Şekil 8) ile verilmiştir. **Tablo 3** ve **Şekil 6-8** incelendiğinde en iyi stator ve rotor materyali M19-Amorf, YMK-Amorf ve Amorf- Amorf olarak belirlenmiştir. Hava aralığı akı yoğunluğuna bakarak yorumlayacak olursak stator ve rotorun amorf nüve formu ile en iyi değer elde **Tablo 3'**de görülmektedir. Bu tasarımın handikabı materyalin maliyetidir. Yüksek manyetik geçirgenliğe sahip olan amorf tabanlı çelik malzeme YMK ve M19'a göre ekonomik olarak öne çıkmamaktadır.



Şekil 3. Üiversal motor sırasıyla (Stator Malzeme M19-M19-M19-YMK-YMK-YMK -Amorf-Amorf-Amorf/Rotor Malzeme M19-YMK-Amorf-YMK-M19-Amorf-Amorf-YMK-M19) nüve formları için verim-ağırlık değişim grafiği

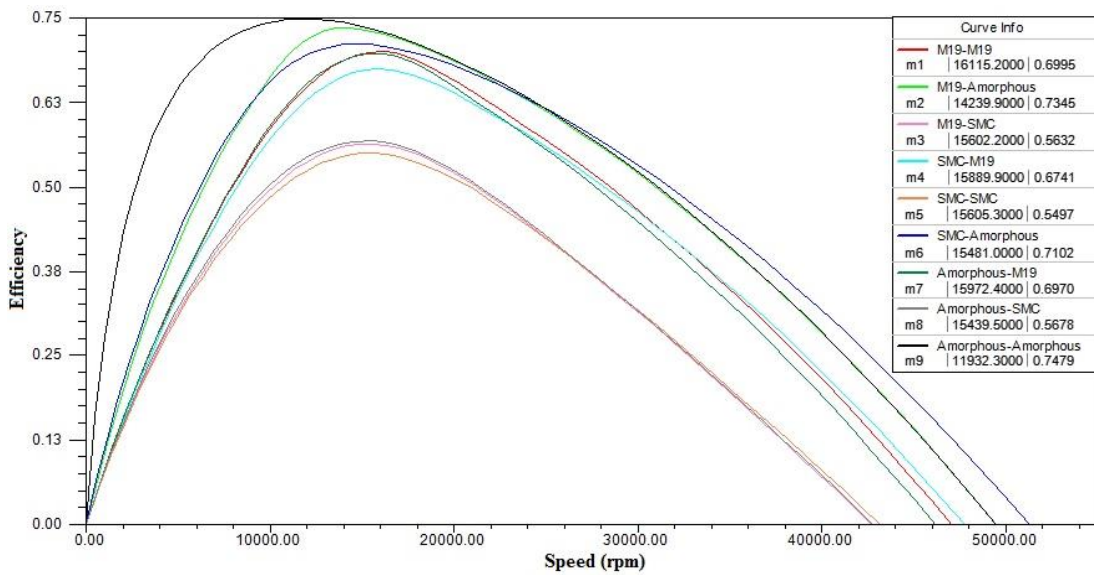


Şekil 4. Üiversal motor sırasıyla (Stator Malzeme M19-M19-M19-YMK-YMK-YMK -Amorf-Amorf-Amorf/Rotor Malzeme M19-YMK-Amorf-YMK-M19-Amorf-Amorf-YMK-M19) nüve formları için verim-ağırlık ve hava aralığı manyetik akı yoğunluğu değişim grafiği

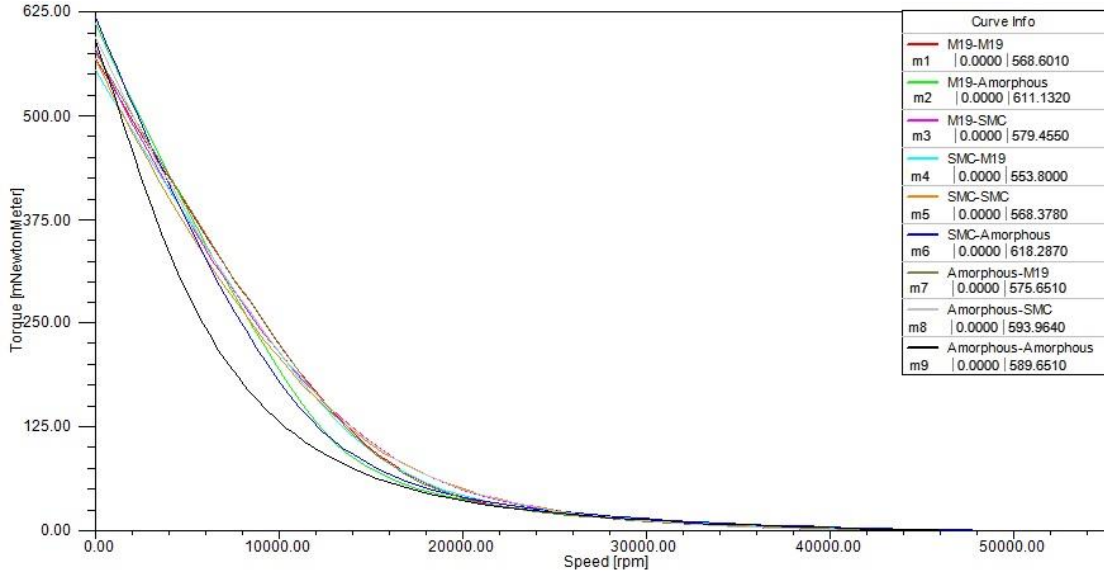


Şekil 5. Üiversal motor sırasıyla (Stator Malzeme M19-M19-M19-YMK-YMK-YMK -Amorf-Amorf-Amorf/Rotor Malzeme M19-YMK-Amorf-YMK-M19-Amorf-Amorf-YMK-M19) nüve formları için verim-tork ve hava aralığı manyetik akı yoğunluğu değer aralığı grafiği.

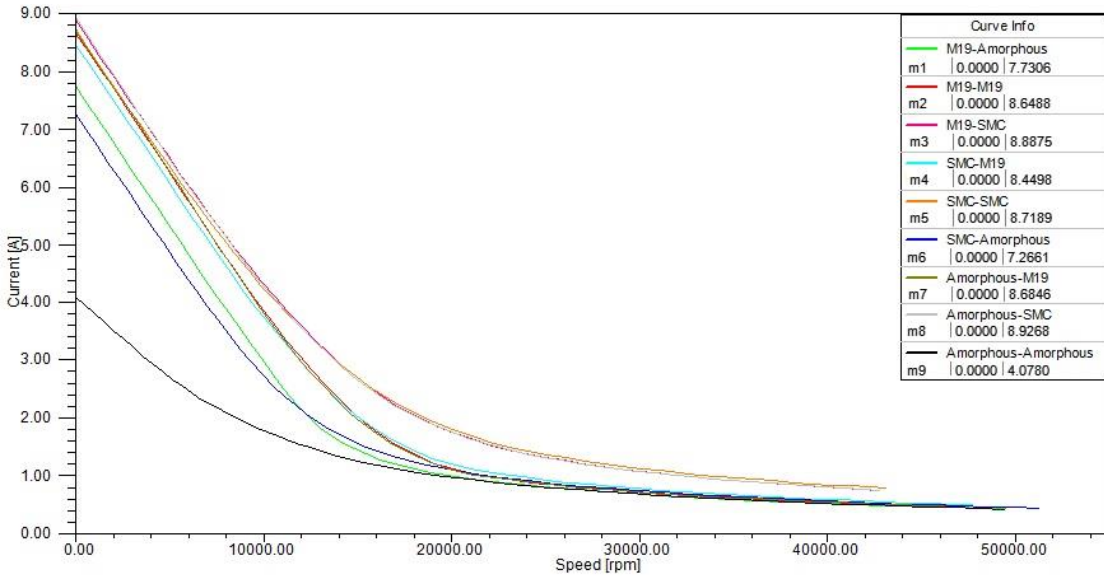
Şekil 3’de görüldüğü üzere stator ve rotor nüvesi farklı materyal formları için yapılan analizlerde hali hazırda kullanılan üiversal motorlar için M19/Amorf konfigürasyonu uygulanması durumunda verim artışı sağlanabilmektedir. Şekil 4’de ise görüldüğü üzere hava aralığı manyetik akı yoğunluğu stator-rotor konfigürasyonun amorf/amorf olduğu durumda en büyük değere ulaşmış ve motor ağırlığı minimuma gelmiştir. Diğer M19 (yönlendirilmemiş silisli çelik) konfigürasyonlarda ise motor ağırlığı arttığı gibi verim değeri de düşmüştür. Şekil 5’de ise verim, tork ve hava aralığı manyetik akı yoğunluğu değerlerinin her bir konfigürasyonda aldığı değer belirlenmiş ve çözüm aralığı gösterilmiştir.



Şekil 6. Stator-Rotor farklı nüveli üiversal motorun verim-hız değişimi (burada m1 M19-M19 için maksimum verim noktası)

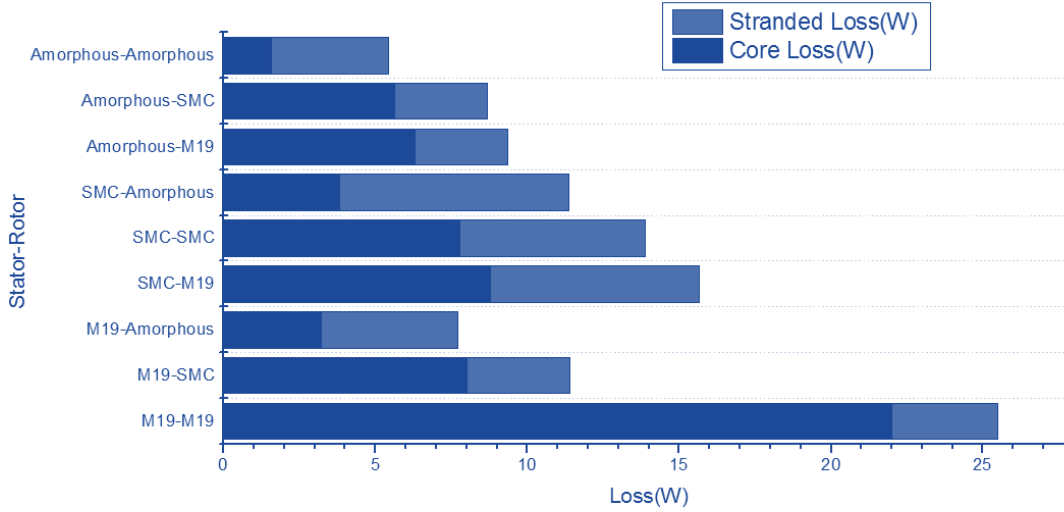


Şekil 7. Stator-Rotor farklı nüveli üniversal motorun tork-hız değişimi (burada m1 M19-M19 için maksimum tork noktası)



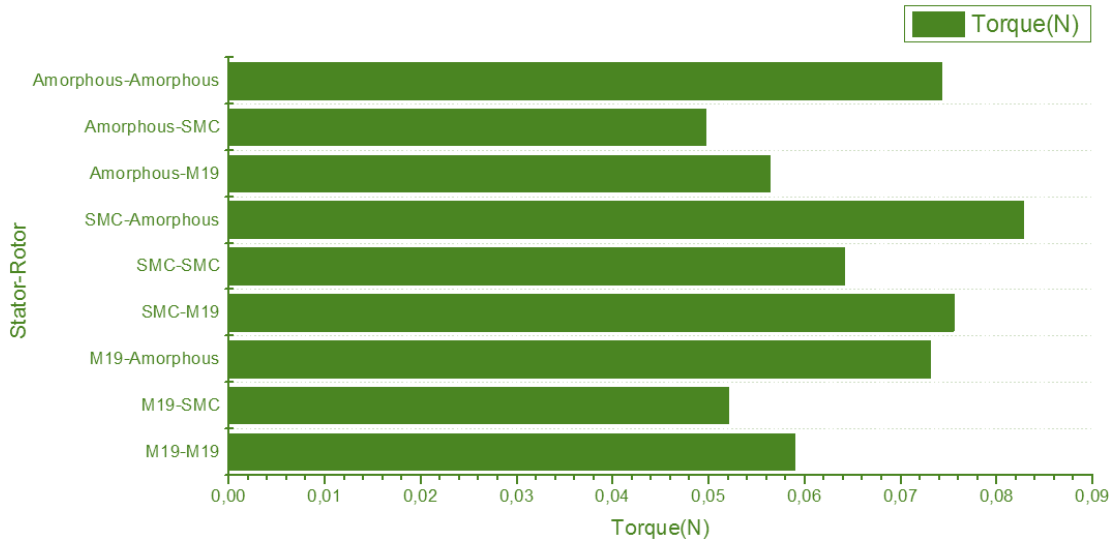
Şekil 8. Stator-Rotor farklı nüveli üniversal motorun akım-hız değişimi (burada m1 M19-Amorf için maksimum akım noktası)

Doyum noktası kırılma noktasından yüksek veya aşağı olmamalıdır. Eğer akı değerleri bu doyum aralığında fazla ise, elde edilen enerji ısı ve yüksek kayıplar olarak gidecek bu durumda tasarlanan makine verimli olmayacaktır. Aynı zamanda doyum bölgesinin çok altında ise akı değerleri bu sefer makine büyük hacimli ve küçük çıkış gücü üretecektir. Bu malzemeler için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir ve doyma indüksiyon değerine ulaşılmamıştır. Simülasyonlarda elde edilen değerler yük altında elde edilmiş ve doyma noktalarına çalışma esnasında makine ulaşmamıştır.



Şekil 9. Stator-Rotor farklı nüveli üniversal motorun demir ve bakır kaybı değişimi

Şekil 6'da stator ve rotoru klasik nüveli (M19-M19) yapı ile karşılaştırıldığında kayıplarda M19-Amorfa göre %48,8, SMC-Amorfa %21 ve Amorfa-Amorfa %63,9 göre azalma olmuştur.



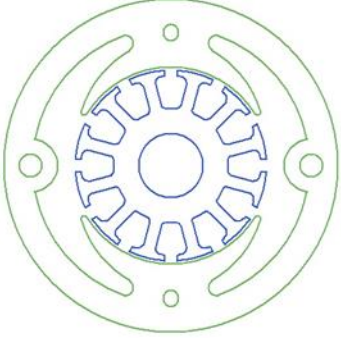
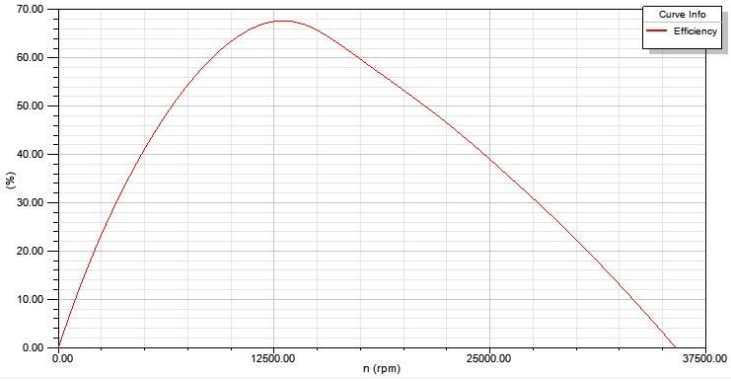
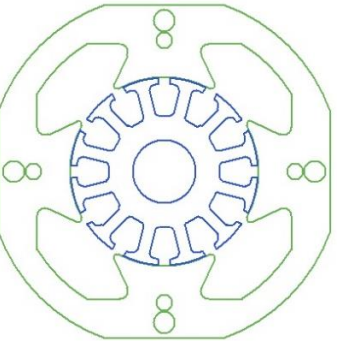
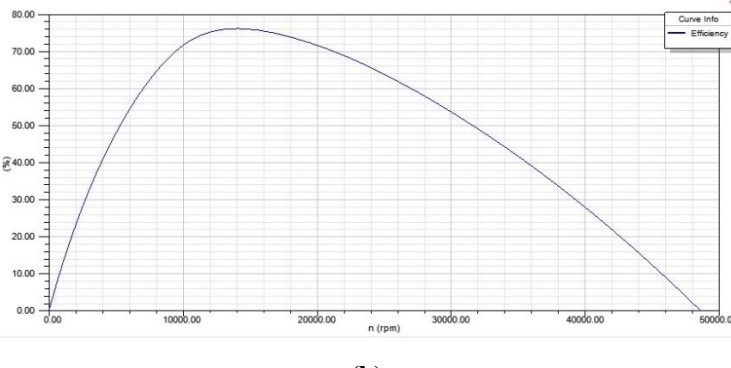
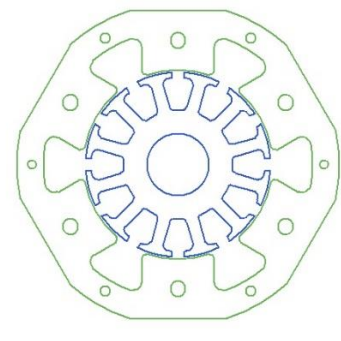
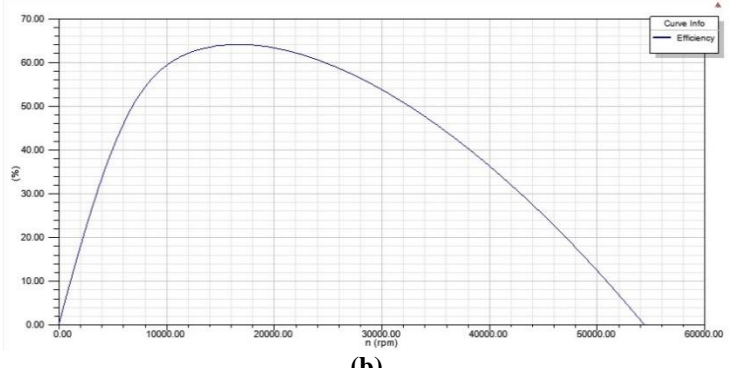
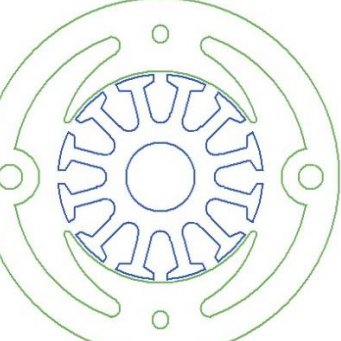
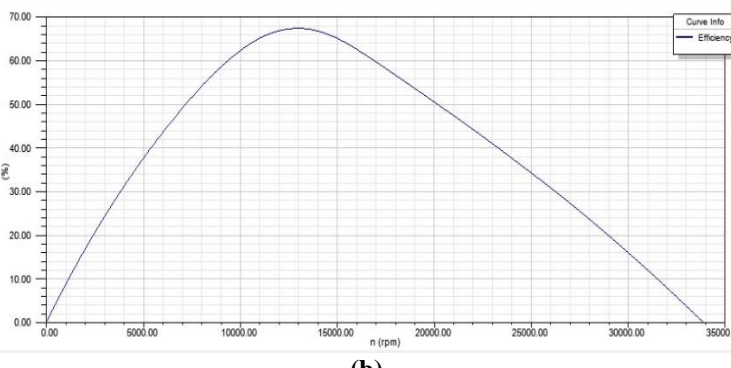
Şekil 10. Stator-Rotor farklı nüveli üniversal motorun tork değişimi

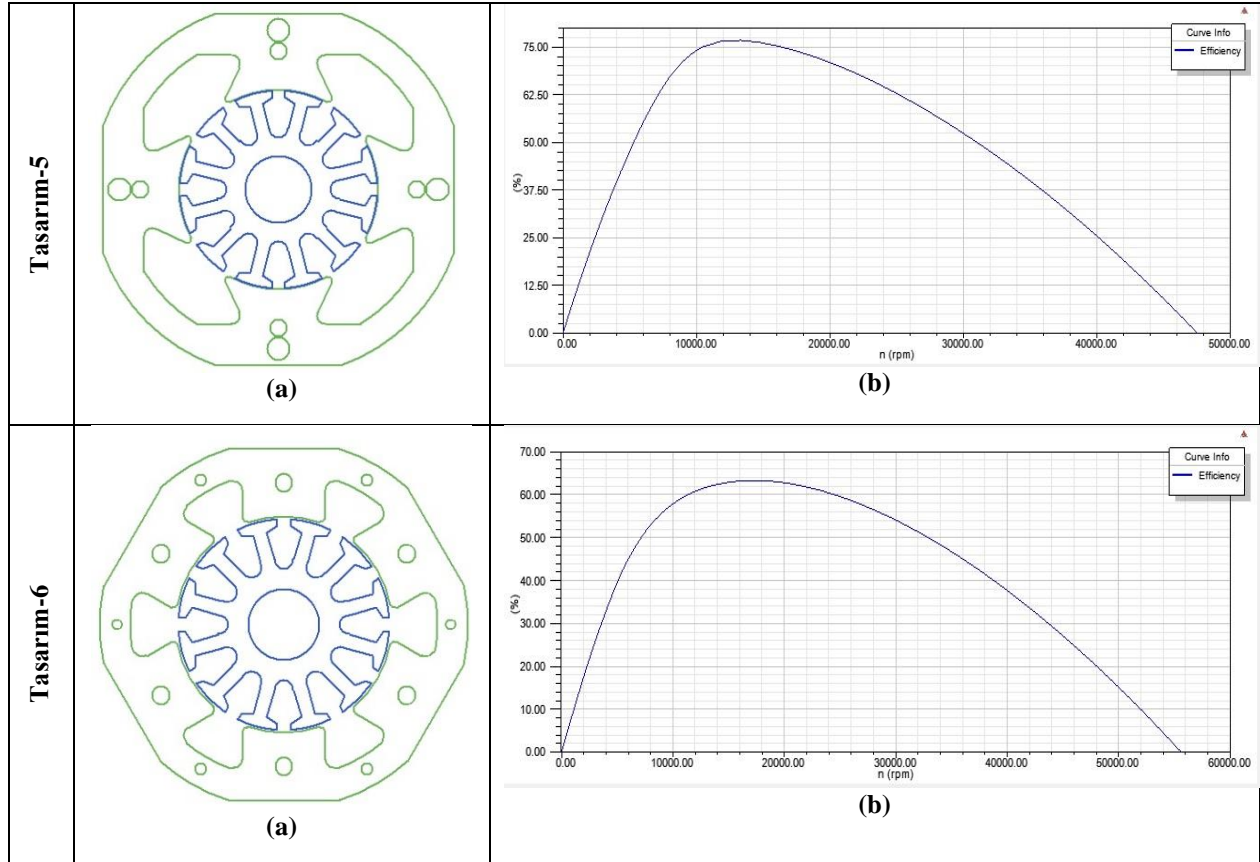
Şekil 7'de stator ve rotoru klasik nüveli (M19-M19) yapı ile karşılaştırıldığında elektromanyetik torkta M19-Amorf %29,7, SMC-Amorf %29,2 ve Amorfa-Amorfa göre %31,9 artma olmuştur. Ayrıca stator ve rotoru klasik nüveli (M19-M19) yapı ile karşılaştırıldığında ağırlıkta M19-Amorf %1,26, SMC-Amorf %2,6 ve Amorfa-Amorfa %4,4 azalma olmuştur.

5. Üniversal Motorun Farklı Stator-Rotor Tasarım Analiz Sonuçları

Çalışmanın ana amacını oluşturan farklı nüve malzemeleri için performans karşılaştırmasını farklı rotor ve stator yapılarını da analizlerin içine katarak yeni üniversal motor tasarımları elde edebiliriz. Çalışmanın bu kısmında sırasıyla iki, dört ve altı kutuplu Üniversal motor tasarımları için iki farklı rotor tasarımı yapılmış ve nüve materyali olarak sırasıyla M19, amorf ve SMC olması durumları incelenmiştir. Performans göstergesi olarak incelenen motora ait hız-verim eğrileri farklı tasarımların yanında **tablo 4**'te sunulmuştur. Üniversal motorun hali hazırda endüstriyel uygulamalardaki sıklıkla kullanımına göre kaynaklarda yeterince incelenmiş bir motor tipi değildir. Bu çalışma ile literatüre farklı rotor tiplerinde ve farklı malzemeler ile hız-verim eğrileri incelenerek bir çalışma sunulmuştur.

Tablo 4. Üniversal motor farklı nüve ve malzeme formlarında tasarımları

Tasarım-1	 <p style="text-align: center;">(a)</p>	 <p style="text-align: center;">(b)</p>
Tasarım-2	 <p style="text-align: center;">(a)</p>	 <p style="text-align: center;">(b)</p>
Tasarım-3	 <p style="text-align: center;">(a)</p>	 <p style="text-align: center;">(b)</p>
Tasarım-4	 <p style="text-align: center;">(a)</p>	 <p style="text-align: center;">(b)</p>

Tablo 4 (devam). Ünliversal motor farklı nölve ve malzeme formlarında tasarımları

Tablo 4'te görüldüğü üzere tasarım bir, iki ve üç aynı rotor yapısı ve farklı stator yapısına, tasarım dört, beş ve altı aynı rotor yapısı ve farklı stator yapısına sahiptir. İlk üç tasarımda malzeme kullanımı sırasıyla M19, amorf ve SMC ve sonraki tasarımlarda ise sırasıyla M19, amorf ve SMC olması durumları incelenmiştir. Her tasarımın yanında verilen verim-hız grafikleri incelendiğinde en iyi tasarımın amorf-amorf malzeme kullanılan motor konfigürasyonundan elde edildiği ve rotor oluk tipinin verimi ve diğer performansı etkileyen motor parametrelerini etkilediği görülmektedir. Aynı tip rotor konfigürasyonlarında verim çok değişmezken rotor oluk tipi değiştirildiğinde tasarım-6'da görüleceği üzere verim %3 kadar azalma göstermiştir.

6. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada görülmüştür ki, klasik nüveli (tanecikleri yönlendirilmemiş) elektrik makinalar yerine yeni düşük kayıplı (amorf nüveli) elektrik makinaları ile değiştirildiğinde ilk yatırım maliyeti olmasına karşın makina ömrü düşünöldüğünde enerji tasarrufunun artacağı, ancak yumuşak manyetik kompozitin klasik nüveli materyal özellikleri sağlayamadığı ve bu yüzden de evsel ve endüstriyel uygulamalar için uygun olmadığı görülmüştür. Stator ve rotorda farklı nüve materyallerinin kullanılması üniversal motorun dinamik karakteristiğini doğrudan etkilemektedir. Özellikle yük altındayken ürettikleri torklarda büyük değişimler olmuştur. Stator-rotor (M19-Amorf) veya (Amorf-Amorf) veya (YMK-Amorf) üniversal motorlar ağırlık, verim ve tork açısından önemli avantaj sağlamaktadır. Bu çalışma ile evsel ve endüstriyel uygulamalarda kullanılabilecek üniversal motorlarda verim, ağırlık, maliyet ve tork gibi iyileştirmeler sunan malzeme konfigürasyonları tercih edilebilir.

Referanslar

Ansoft Corporation, (2020). Maxwell 3D technical notes, 200-1045.

Ansoft RMXprt Application Note Application Note AP05-0201, "A Universal Motor Problem".

Ansys Maxwell (2018). v18, Help File.

Azuma, D., & Hasegawa R., (2008). Audible Noise From Amorf Metal and Silicon Steel-Based Transformer Core, IEEE Transactions On Magnetics, 44(11), 2108-2109.

Başer., T.A., (2013). Kompozit Metalik Camlara Genel Bir Bakış, Mühendis ve Makina, 54(640), 36-44.

- Chang-H., Hsu & Chang Hwa Y., (2009). Systematic Study of Low Loss Amorf Core Transformers: Design and Testing, 8th WSEAS International Conference on Instrumentation, Measurement, Circuits and Systems.
- Cros, J, Viarouge P., Chalifour Y., & Figueroa J., (2004). A New Structure of Universal Motor Using Soft Magnetic Composites, IEEE Transactions On Industry Applications, 40(2), 1904-1911.
- Dems M., & Komezka K., (2014). Performance Characteristics of a High-Speed Energy-Saving Induction Motor with an Amorf Stator Core, IEEE Transactions On Industrial Electronics, 61(6), 1877-1882.
- Ertugrul Soong, N., W.L., Gayler J., & Rybak T., (2004). High-Efficiency Magnetic Ballast Design Utilizing Amorf Metal Core, Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2004).
- Hasegawa R.,(1999). US Patent No. 5,868,123.
- Hong Joo, D.K., Woo D., B.C., Jeong Y.H., & Koo D.H., (2013) Investigations on a Super High Speed Motor-Generator for Microturbine Applications Using Amorf Core, IEEE Transactions On Magnetics, 49(7) 2132-2137.
- Jack, A., Mecrow B., Dickinson P., Jansson P., & Hultman L. (2000). Design and Testing of a Universal Motor Using a Soft Magnetic Composite Stator, Industry Applications Conference, Conference Record of the 2000 IEEE, 1(1) 46 – 50.
- Jianwei L., & Ting, L., (2010) Comparison and analysis of classical motor with Amorf iron motor based on Ansoft, 2nd International Conference on Intelligent Human–Machine Systems and Cybernetics, Nanjing, 305–308.
- Johnson, L., A., Bailey D. J., Cornell E. P., & Hegyi S. M., (2020) Application of Low Loss Amorf Metals In Motors and Transformers, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS–101(7), 2109–2114.
- Jun-Fang L., Jian-wei, L. Chong-nian, Q., (2019) Research on a novel Fe–based amorphous electric motor, IEEE Computer Science and Information Technology, China, 9, 184–187.
- Khazin Rajendran A. F., Khan S., Gobbi R., & Anayet K. (2008). Design of a Three Phase Induction Motor Based On Efficiency Improvement Using Amorf Iron Material, 2nd Engineering Conference on Sustainable Engineering Infrastructures Development & Management, Kuching, Sarawak, Malaysia
- Kim B.-T., (2006). Design of New Type Universal Motor Using Soft Magnetic Composites, Journal of Electrical Engineering & Technology, 1(2), 211-215.
- Liu Woodburn H., Lin D., S., Wu T. X., Wei J., & Cao K., (2010). Design of a High Speed Universal Motor for Organic Agriculture Applications, PIERS Proceedings, Cambridge, USA.
- Luciano B.A., Morais M.E., & Kiminami C. S., (1999). Single phase 1-kVA Amorf core transformer: design, experimental tests, and performance after annealing, IEEE Transactions on Magnetics, 35(4), 2152-2154.
- Miller, K. J., (2010). Investigation of FeCo Nanocomposites for High Frequency Applications, PhD. Thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 176-179.
- Mischler W. R., G. M., Rosenberry Frischmann P. G., & Tompkins R. E., (2018) Test Results On a Low Loss Amorf Iron Induction Motor, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS–100(6), 2907–2911.
- Retrieved from : <http://www.cluster2.hostgator.co.in/files/writeable/uploads/hostgator50505/file/ugetcatalog.pdf>
- Retrieved from: Höganäs, Somaloy® Soft Magnetic Composite Technology, Prototyping Material Datasheet, http://www.hipih.com/SMC/datasheet/SMC_ffuqO8OBwhVjZ.htm
- Sato A., H., Terada T., Nagata S., Kurita Matsuda Y., Fukui K., Azuma D., & Hasegawa R., (2009). Development of distribution transformer based on new Amorf metals Electricity Distribution - Part 1, 20th International Conference and Exhibition on , CIRED Prague, 1 – 4.
- Soltanzadeh, K. Tavakoli, A. & Arbab, P.B. (2012). Effects of Amorf core Distribution Transformers in improvement the functioning of the electricity distribution system”, Electrical Power Distribution Networks (EPDC), Proceedings of 17th Conference, 1-7.
- Steinmetz, T., Cranganu-Cretu, B., & Smajic J., (2010). Investigations of No-Load and Load Losses in Amorf Core Dry-Type Transformers, XIX International Conference on Electrical Machines – ICEM, Rome.
- Wang Le J, L.,, Zhang Le S., & Huang G., S., (2011). Development of the New Energy-Efficient Amorf Iron Based Electrical Motor”, International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring, 2059-2061.

Wang Z., Masaki R., Morinaga S., Enomoto Y., Itabashi H., Ito M., & Tanigawa S., (2011). Development of an Axial Gap Motor With Amorf Metal Cores, *IEEE Transactions On Industry Applications*, 47(3), 2211-2217.

Zhou P., Brauer J.R., Stanton S., Cendes Z. J., & Ebben R. N. (1999). Dynamic Modeling of Universal Motors, *Electric Machines and Drives*, 419 – 421.



Mobil Robotların Formasyon Kontrolünde Giriş Kısıtlamaları

Input Constraints in Formation Control of Mobile Robots

Meral Kılıçarslan Ouach¹ , Tolga Eren¹ 

¹Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü. 71450 Kırıkkale/TÜRKİYE

Başvuru/Received: 03/04/2021

Kabul / Accepted: 04/06/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 18/06/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Bu çalışmada, Giriş/Çıkış Doğrusallaştırma Tekniği ile, holonomik olmayan mobil robotlara Lider-Takipçi Formasyon Kontrolü uygulandığında, daha iyi sonuçlar veren başlangıç koşulları araştırılmıştır. Başlangıç koşulları bir lider ve iki takipçi robotta denenmiştir. Kontrol kuralı, ilk takipçinin lidere göre istenilen mesafe ve açıyı; ikinci takipçinin lidere göre ve ilk takipçiye göre istenilen mesafeyi koruması şeklindedir. Simülasyonlarda başlangıç koordinatları, hızları ve açılarının değiştirilmesinin robotların tüm lider-takipçi yolculuğunda farklı davranmasına sebep olduğu gözlemlenmiştir. Makalenin sonunda, en iyi takip için optimal başlangıç koşulları önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Robot formasyonu, sürü robotları, formasyon kontrolü”

Abstract

The paper investigates the better possible combined initial conditions of leader-follower formations of nonholonomic mobile robots for Input/Output Linearization Technique. Initial conditions are applied to two followers and one leader robot. The first follower tries to maintain desired distance and angle towards the leader while the second follower tries to maintain desired distances to the first follower and the leader. In simulations, it is observed that, changing initial relative positions and velocities as well as angles can cause robots act differently throughout the whole leader-follower trajectory. At the end, optimum initial conditions are proposed for the best trajectory.

Key Words

“Robot formation, swarm robotics, formation control”

1. Giriş

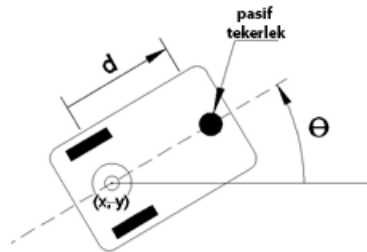
Robot teknolojilerinin gelişmesi, sürü robotlarını gündeme getirdi. Birden fazla robotu aynı anda koordine etmek, takipçilerin lideri izlemesini sağlamak, hepsine ortak bir hedef belirlemek ya da ortakça bir iş üzerinde çalışmalarını sağlamak beraberinde çeşitli kontrol kurallarının da geliştirilmesine yol açtı. Robot formasyon kontrolü ile bir robot grubunun bütünde ve bireysel olarak hareketi gözlemlenir. (Desai vd., 1998, Desai vd., 2001) çalışmasında, holonomik olmayan mobil robotlardan oluşan bir grubun robotların birbirlerine göre istenilen mesafe ve açıların korunması amacıyla, lider ve takipçiler arasında uzaklık-uzaklık ve uzaklık-açının kontrol edildiği iki farklı geri beslemeli kontrol kuralı geliştirmişlerdir. (X. Wang vd., 2012) çıktı düzenleme bakış açısı ile anahtarlama ara bağlantılı topolojisine sahip kanonik dahili model tabanlı dinamik geri besleme kullanmıştır. Ayrıca lideri olmayan çok robotlu denetleyici mimarili bir grup robotu da kontrol etmek mümkündür. (Meng vd., 2019) modifiye edilmiş doğrusal ikinci dereceden düzenleyici yöntem ile bu tür bir robot grubu için rehberlik ve kontrol kuralı tasarlamıştır. (Ma vd., 2021) özdeş olmayan robotlar üzerinde çalışmış ve optimal dinamik formasyon probleminin önerilen olay tetiklemeli mekanizmalarla sadece aralıklı iletişim ile paylaşılabilir bir kontrol yasası ile çözülebileceğini göstermişlerdir.

Robot formasyon kontrolü sadece basit bir düz arazide değil, insansız su jeti yüzey araçları (D. Wang & Fu, 2019), insansız hava araçları (Gosiewski & Ambroziak, 2012), uçaklar (Fierro vd., 2001, Giulietti vd., 2000), otonom su altı araçları (Edwards vd., 2004, Skjetne vd., 2002) ve uzay robotları (Hirzinger vd., 1994) gibi birçok alana uygulanabilir.

Robot formasyonu ile, takipçiler bir veya birden fazla lideri takip ettiklerinde tüm formasyonu korumanın yanında diğer bazı problemlere de çözüm bulmaya çalışılır. Literatürde birçok yazar, engellerden kaçınma (Wen vd., 2018), rijid formasyonu koruma (T Eren vd., 2005, Tolga Eren, 2012), zamanla değişen çıktı oluşumu takibi (Hua vd., 2019), formasyonu bozmaya çalışan etmenler ve bilinmeyen kontrol yönü (Yang & Fan, 2019), uyumsuz oryantasyona neden olan ölçüm hataları (Li vd., 2019), çarpışmalar (Flores-Resendiz & Aranda-Bricaire, 2020) gibi sorunlara çözüm üretmeye çalışmışlardır.

Lider robotun önceden tanımlanmış bir yörünge boyunca hareket ettiği bir robot grubunda, geri kalan diğer robotlar bir konumdan diğer konuma geçerken mesafelerini ve açılarını ayarlarlar, aynı zamanda liderlerini takip ederler. Formasyon kontrolü çoğunlukla böylesi bir lider-takipçi yaklaşımı ile ilgilenir. Geri besleme denetleyicileri tarafından yapılan formasyon kontrolü her durumda başarılı bir yörünge garanti etmez. Kontrolörlerin değişkenlerinin başlangıç değerleri en uygun şekilde seçilmezse çarpışma veya formasyonun bozulması gibi sorunlar ortaya çıkabilir. Bu çalışmada, (Desai vd., 1998, Desai vd., 2001)'in geri besleme denetleyicileri ve holonomik olmayan lider-takipçi sisteminin değişkenlerinin farklı başlangıç koşulları altında robot formasyonunun tepkileri araştırıldı. Uzaklık-açı kontrolü ve uzaklık-uzaklık kontrolü olan geri besleme kontrolörleri (Desai vd., 1998, Desai vd., 2001) tarafından Giriş/Çıkış Doğrusallaştırma yönteminden türetilmiştir. Bu kontrol sistemi, uygun başlangıç koşulları seçildiğinde iyi çalışır ve hesaplaması kolaydır. Bu başlangıç koşulları, robotların harekete başlamadan önceki koordinatları, başlangıç hızları, başlangıç açısal hızları, başlangıç açıları, liderlere olan mesafeler ve robotların başlangıçtaki birbirine olan yönelimleridir. Bu başlangıç koşullarının alabileceği farklı değerlerin birlikte denemesi ile takipçilerin davranışlarının ve bütünde robot formasyonunun değiştiği gösterilmiştir. Bu başlangıç koşullarının belirli aralıklardaki bazı değerlerinde robotların çarpıştığı veya istenilen robot formasyonunun elde edilemediği gözlemlenmiştir.

Bu çalışmanın temel katkısı robot formasyonunda her bir robotun başlangıç koşulları söz konusu olduğunda Giriş/Çıkış Doğrusallaştırma Kontrol Yasası için en iyi başlangıç koşullarını tespit etmektir. Bu çalışma robot formasyonu üzerinde çalışan araştırmacılar için doğru başlangıç koşullarının seçilmesine yardımcı olacaktır.



Şekil 1. Basit Bir Mobil Robot ve Değişkenleri (Desai vd., 1998, Desai vd., 2001)

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir; 2. Bölüm bazı temel bilgilere ve problemin tanımlanmasına ayrılmıştır. 3. Bölümde simülasyonlara yer verilmiş ve 4. Bölümde elde edilen bulgular, 5. Bölümde ise bu çalışmanın ana katkısı ve varılan sonuç yer almaktadır.

2. Temel Bilgiler ve Problemin Tanımlanması

Bir robot grubu liderlerini takip ettiklerinde aynı zamanda formasyonu mümkün olan en iyi şekilde sürdürmeye çalışırlar. Takipçi robotlar çeşitli kontrol yasalarından yardım alarak lider robotları takip ederler. (Desai vd., 1998, Desai vd., 2001) çalışmasında formasyon kontrolü için Giriş/Çıkış Doğrusallaştırma Kontrol Yasasını kullanmıştır. Bu kontrol sistemi diğer formasyon kontrolü sistemlerine göre daha yüksek seviyede ama daha düşük karmaşıklıkta ve hesaplanması daha kolaydır. Fakat bu kontrol sisteminin bazı değerlerinin çeşitli başlangıç koşullarında formasyon bozulur veya robotlar birbiri ile çarpışır veya formasyon hiç oluşmaz. Bu çalışmada bu başlangıç koşullarının çeşitli değerlerinde robot grubunun formasyon tepkisi simülasyon yoluyla elde edilmiştir.

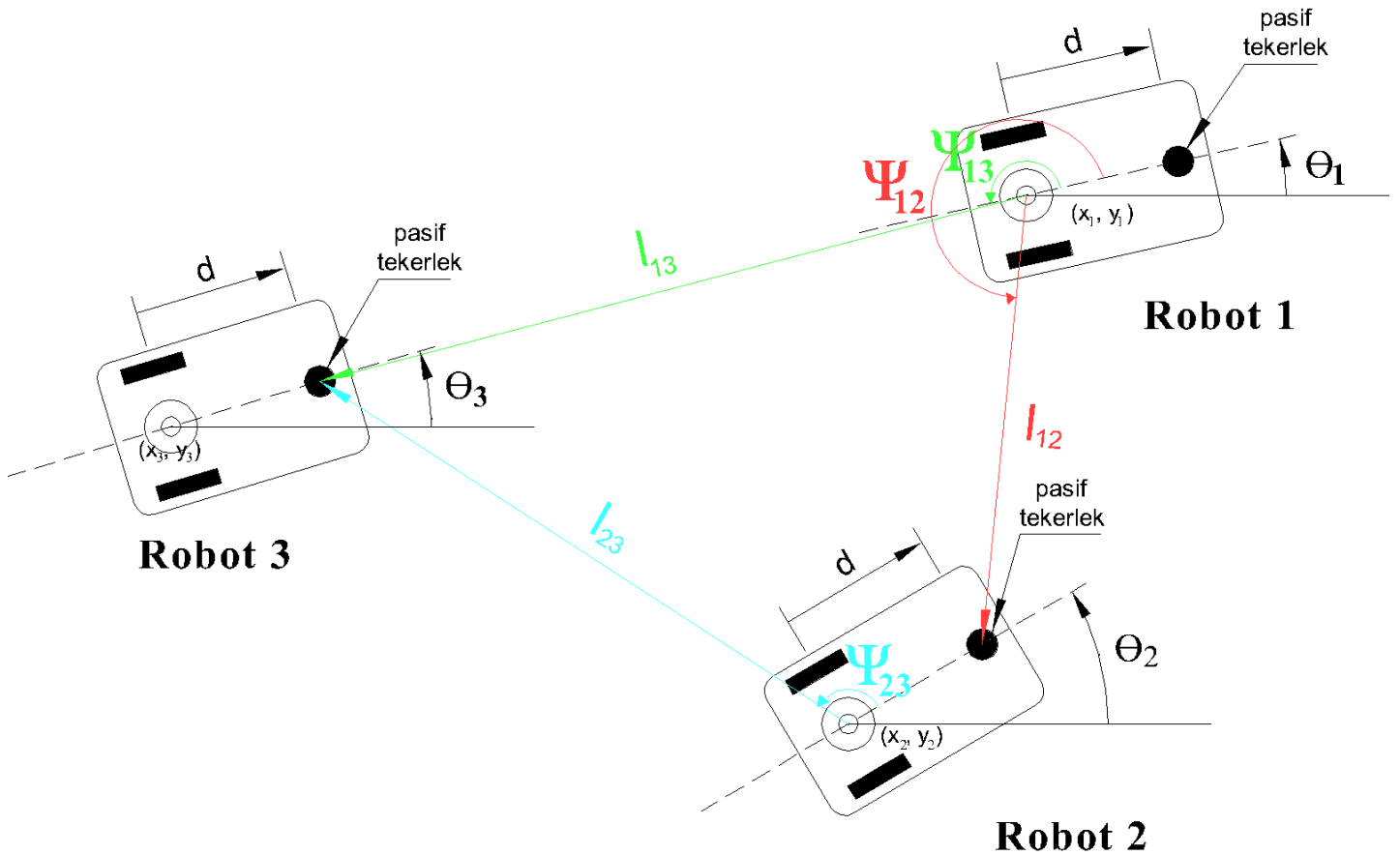
Şekil 1'deki gibi, önde pasif bir tekerleği, arkada ise ortak eksenli iki adet tahrikli tekerleği olan her robotun basit bir diferansiyel tahrik konfigürasyonu kullanılarak hareket ettirildiği varsayılır. Bu durumda, bu türdeki robotların denklemleri;

$$\dot{x}_i = v_i \cos \theta_i$$

$$\dot{y}_i = v_i \sin \theta_i$$

$$\dot{\theta}_i = \omega_i \quad (1)$$

formülleri ile ifade edilir. (1) nolu denklemlerde, alt simge i ile i . robot gösterilmiştir. (x, y, θ) ; referans noktasına göre robotun arka aksının konumunu (x, y) ve oryantasyonunu (θ) ifade eder. ω_i açısal hız ve v_i arka aksın merkezinin hızıdır. x ve y düzlemlerinde yer değiştirmelerin türevi, çizgisel hız ve robotun θ açısı ile orantılı; θ açısının türevi ise açısal hıza eşittir.



Şekil 2. $l - \Psi$ Kontrol ve $l - l$ Kontrol İçin Gösterim (Desai vd., 1998, Desai vd., 2001)

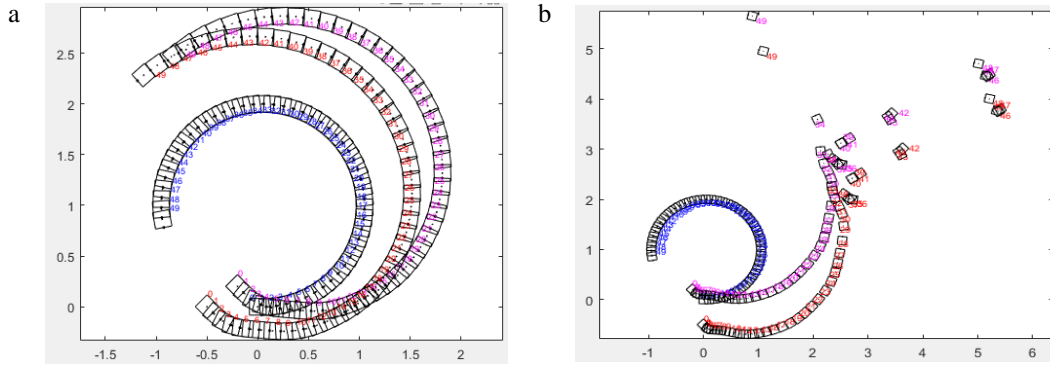
Şekil 2’de $l-l$ kontrol ve $l-\Psi$ kontrol kurallarının şematığı gösterilmiştir. Şekilde üç adet özdeş holonomik olmayan mobil robot vardır; Robot 2, $l-\Psi$ kontrol yasasına göre Robot 1’i, Robot 3 de $l-l$ kontrol yasasına göre hem Robot 1’i hem de Robot 2’yi takip etmektedir. Bu kontrolörün amacı, Robot 2’nin Robot 1’e göre olması istenilen açı Ψ_{12}^d ve mesafe l_{12}^d (Robot 1 lider ve Robot 2 onun takipçisidir) ve Robot 3’ün hem Robot 1 hem de Robot 2’ye göre olması istenilen l_{13}^d ve l_{23}^d (hem Robot 1 hem de Robot 2, Robot 3’ün lideridir) mesfelerinin korunmasını sağlamaktır. l_{12} , l_{13} ve l_{23} lider robotun arka aksının merkezi ile takipçi robotun ön tekeri arasındaki mesafelerdir. Arkadaki tekerleklerin merkezi ile öndeki pasif tekerleğin arasındaki mesafe d ’dir.

3. Simülasyonlar

Simülasyonlarda çeşitli değerlerin farklı başlangıç koşulları denenmiştir, doğrusal ve çembersel takiplerde takipçilerin lideri izleme eğilimleri gözlemlenmiştir. Şekillerde mavi renkteki adım sayıları ile gösterilen robot lider robotu, kırmızı renkteki adım sayıları ile gösterilen robot lider robotu $l-\Psi$ ve $l-l$ kontrol kuralı ile takip eden 2. robotu ve pembe renkteki adım sayıları ile gösterilen robot 2. robotu ve lider robotu $l-l$ kontrol kuralı ile kontrol eden 3. robotu göstermektedir. Robotlar iki boyutlu düzlemde hareket etmişlerdir. l_{12} , l_{13} ve $l_{23} > 2d$ koşulunun olmadığı durumlar için de simülasyonlar yapılmıştır.

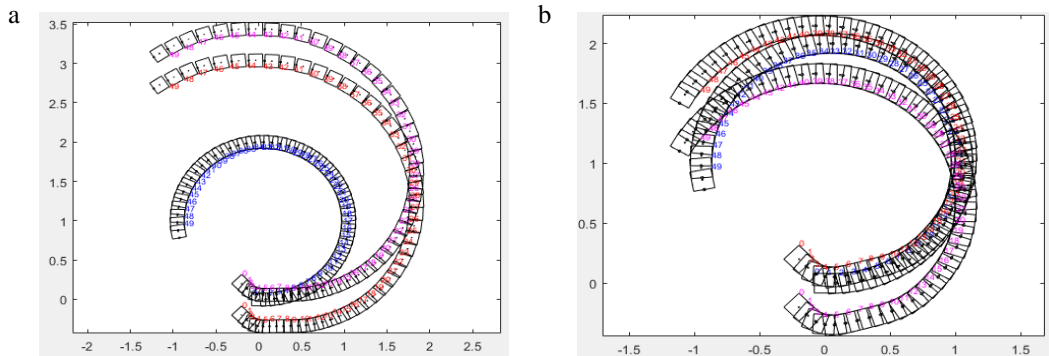
3.1 Başlangıç Konumları

Bu bölümde robotlar çeşitli koordinatlarda konumlandırılıp robotların hareketleri gözlemlenmiştir. Konumlandırma için robotların orjinleri referans alınmıştır. Robot 1 her zaman (0,0) noktasında konumlanmıştır.



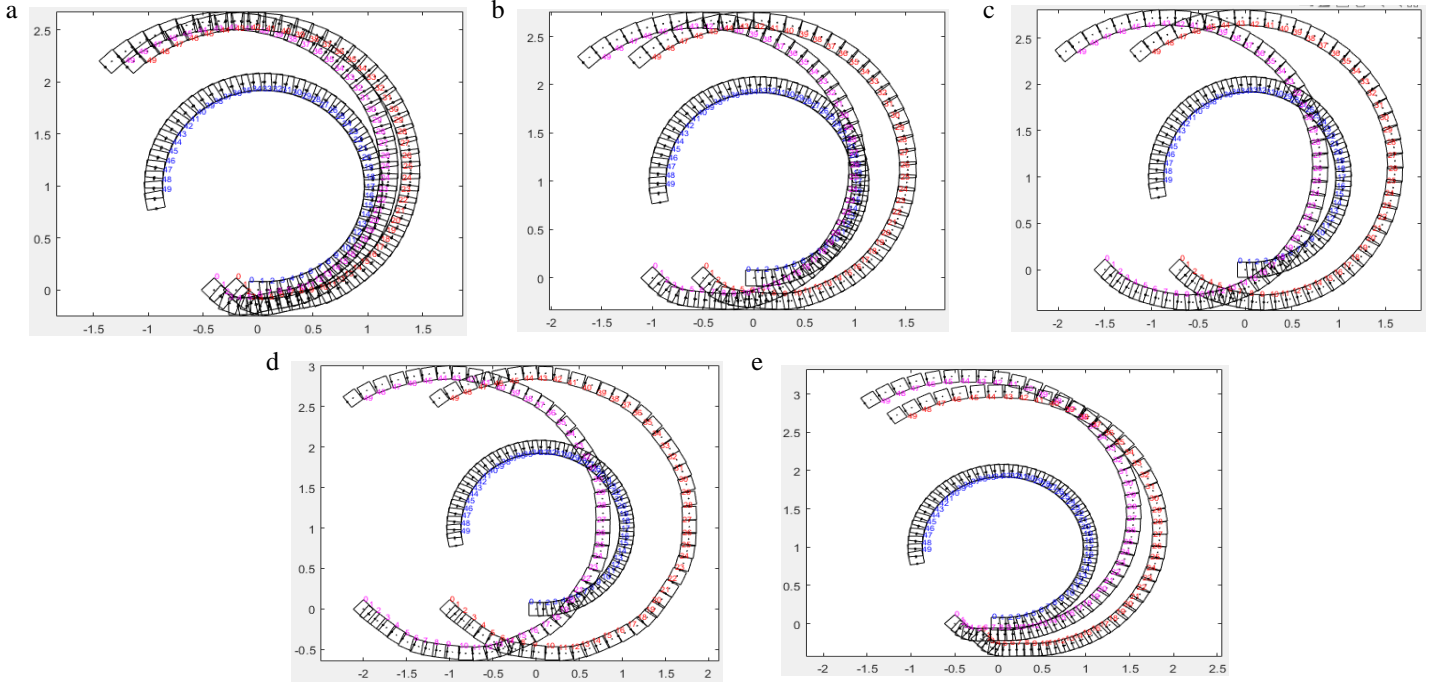
Şekil 3. (a) Liderin En Önde Başlaması; (b) 2. Robotun En Önde Başlaması

Lider Robot harekete en önde başlamadığı durum için gösterilen, izlemenin tam olarak yapılamadığı Şekil 3a’da 2.Robot (-0.5,0), 3. Robot (-0.2,0.2) noktalarından; b’de 2.Robot (0,-0.5), 3. Robot (-0.2,0.2) noktalarından hareketlerine başlamışlardır.



Şekil 4. (a) 3. Robotun Çemberin İçinden, 2. Robotun Çemberin Dışından Başlaması; (b) (a)’daki Durumun Ters

Harekete 3. Robot çemberin içinden, 2. Robot çemberin dışından başladığı zaman 3. Robot çemberin dışına çıkarak hareketini devam ettiriyor. Tam tersi olduğu durumda; harekete 2. Robot çemberin içinden, 3. Robot çemberin dışından başladığı zaman, bu kez 3. Robot çemberin dışından içeri geçerek hareketini devam ettiriyor. Şekil 4a’da 2.Robot (-0.2,-0.2), 3. Robot (-0.2,0.2) noktalarından; b’de 2.Robot (-0.2,-0.2), 3. Robot (-0.2,-0.2) noktalarından hareketlerine başlamışlardır.

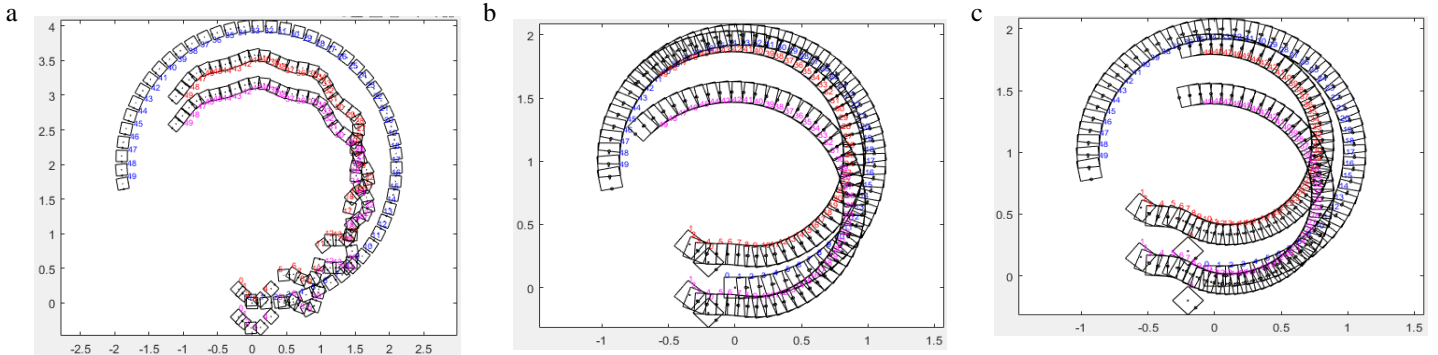


Şekil 5. Üç Robotun Arka Arkaya Sıralanarak Hareketlerine Başlamaları (a) Mesafeler İstenen Uzaklıktan Küçük; (b) Mesafeler İstenen Uzaklıkla Aynı; (c) Mesafeler İstenen Uzaklıktan Büyük; (d) Mesafeler İstenen Uzaklığın İki Katı; (e) Üçüncü Diğer İkisinin de Arkasında

Harekete, 2. Robot 1.Robotun arkasında, 3.Robot da 2.Robotun arkasında olacak şekilde üç robot da arka arkaya sıralanarak başlarsa, mesafeler istenen uzaklıktan küçük olduğunda çarpışma meydana geliyor, mesafeler istenen uzaklıkla aynı ve istenen uzaklıktan büyük olduğunda çarpışma meydana gelmiyor. Mesafeler istenen uzaklığın iki katı kadar olduğunda izlemeler daha da uzaktan yapıyor. Eğer 3. Robot diğer ikisini de görece şekilde arkalarında olursa izleme çok uzaktan yapıyor. Şekil 5a'da 2.Robot (-0.2,0), 3. Robot (-0.4,0) noktalarında; b'de 2.Robot (-0.5,0), 3. Robot (-1,0) noktalarında; c'de 2.Robot (-0.7,0), 3. Robot (-1.5,0) noktalarında; (d)'de 2.Robot (-1,0), 3. Robot (-2,0) noktalarında; (e)'de 2.Robot (-0.2,-0.2), 3. Robot (-0.5,0) noktalarından hareketlerine başlamışlardır.

3.2 Başlangıç Hızları

Bu bölümde robotların harekete çeşitli hızlarla başlayıp devamında verdiği tepkiler gözlemlenmiştir.



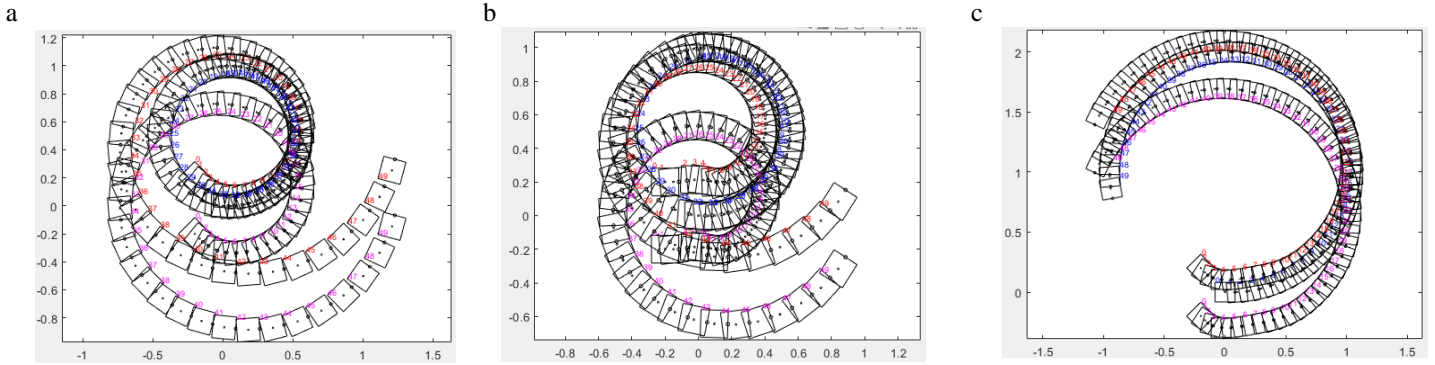
Şekil 6. (a)- (b) Liderin Takipçilerden İki Katı Hızla Başlaması; (c) Takipçilerle Liderin Başlangıç Hızları Arasında Çok Fark Olması Durumu

Başlangıçta, lider takipçilerin hızının iki katı hızla başladığında; eğer bu hız çok fazla ise, takipçi lideri izlemekte zorlanıyor. Şekil 6 hem a hem de b'de lider takipçilerin iki katı hızla başlıyor. Fakat a'da liderin hızı 0.2 birim/s iken b'de liderin hızı 0.1 birim/s'dir. Şekil

6 c'deki gibi eğer takipçi ve liderler arasında çok hız farkı varsa (negatif yönler dahil) takipçilerin ikinci adımda ani konum değiştirdiği gözlemlenmiştir.

3.3 Başlangıç Açısal Hızları (ω)

Bu bölümde robotların harekete çeşitli açısal hızlarla başlayıp devamında verdiği tepkiler gözlemlenmiştir.

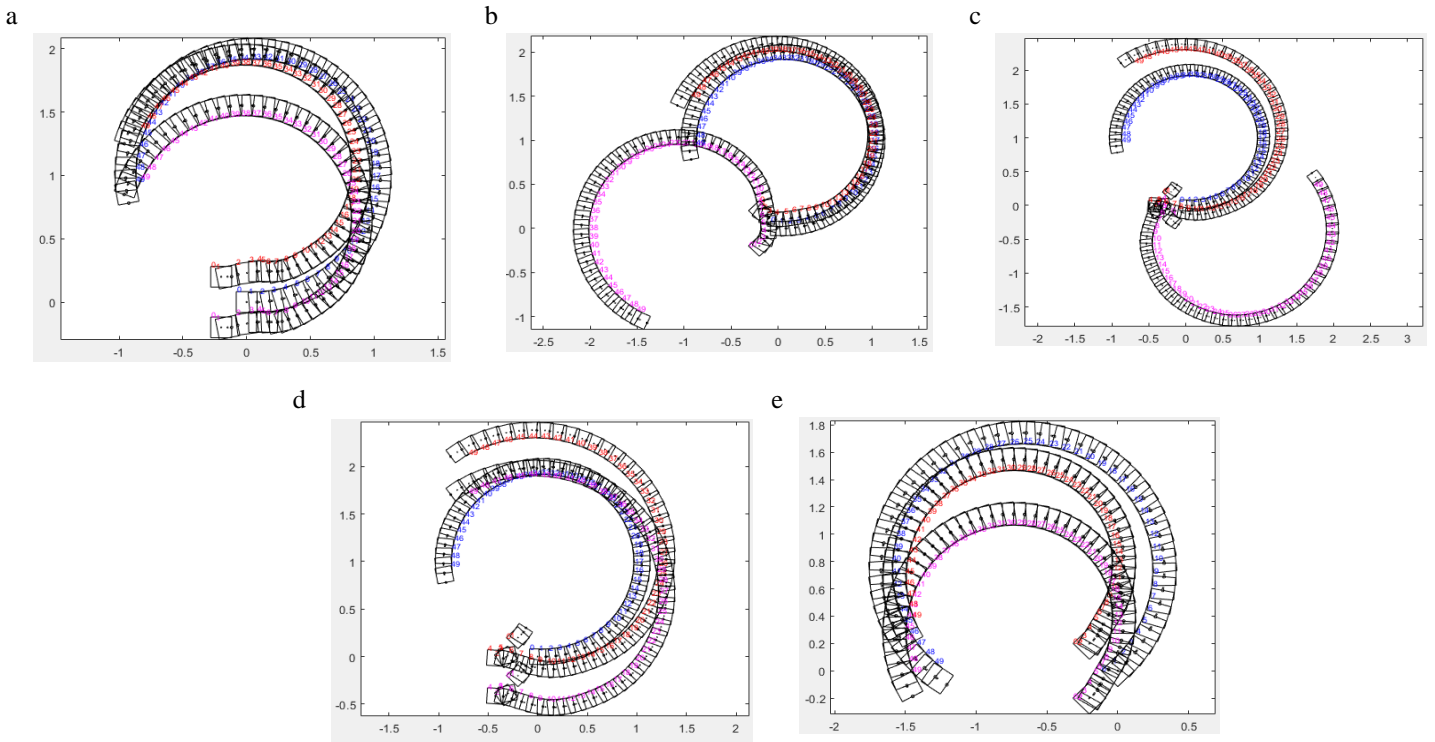


Şekil 7. (a) Takipçilerin Açısal Hızlarının Liderinkinden Fazla Olması; **(b)** Üçünün de Başlangıç Açısal Hızlarının Aynı Olması; **(c)** Takipçilerin Liderden Daha Büyük Açısal Hıza Sahip Olması

Takipçilerin başlangıçtaki açısal hızları liderinkinden fazla olursa, takibin sonlarına doğru takipçilerin rotadan uzaklaştığı gözlemlendi. Şekil 7a'da liderin açısal hızı 0.2 rad/s ve takipçilerin başlangıç açısal hızı ise 0.1 rad/s seçildiğindeki simülasyon görülebilir. Benzer durum Şekil 7b'de görülmüştür. Burada hepsinin başlangıç açısal hızları 0.1 rad/s'dir. Takipçilerin liderden daha büyük açısal hızı sahip olması durumunda Şekil 7c'de takibin daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Burada liderin açısal hızı 0.1 rad/s ve takipçilerin başlangıç açısal hızları ise 0.2 rad/s seçilmiştir.

3.4 Başlangıç Açıları (θ)

Bu bölümde robotların harekete çeşitli θ açılarıyla başlayıp devamında verdiği tepkiler gözlemlenmiştir. Bu θ açısının konumu Şekil 2'de görülebilir.

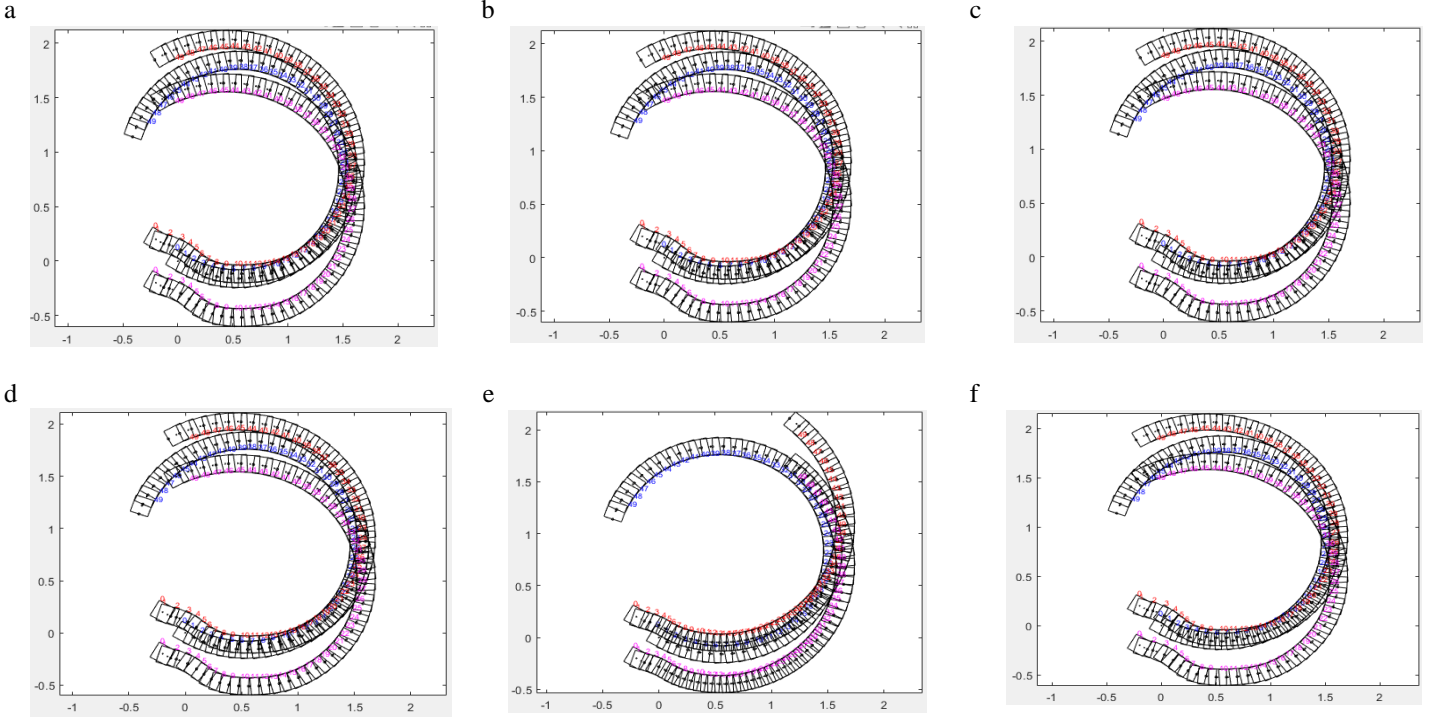


Şekil 8. (a) Bütün Başlangıç Açılarının Sıfır Olması; **(b)** Üçüncü Robotun Harekete Diğerlerine Yönelerek Başlaması; **(c)** Takipçilerin Harekete Birbirlerine Yönelerek Başlamış Olması; **(d)** İki Takipçinin Aynı Pozitif Yönde Harekete Başlaması; **(e)** Üçünün de Aynı Pozitif Yönde Harekete Başlaması

Bütün robotların başlangıçtaki açıları sıfır olduğunda Şekil 8a'da çarpışma gözlemlenmiştir. 3. Robotun diğerlerine yönelerek harekete başlaması durumunda takip yapamamıştır. Şekil 8b'de liderin başlangıç açısı 0 rad, 2. Robotun $-\pi/4$ rad, 3. Robotun ise $\pi/4$ rad seçilerek bu durum gözlemlenmiştir. Takipçilerin yüzleri birbirine dönük olarak harekete başladığında da 3. Robot takip yapamamıştır. Şekil 8c'de liderin başlangıç açısı 0 rad, 2. Robotun $\pi/4$ rad, 3. Robotun ise $-\pi/4$ rad seçilerek bu durum gözlemlenmiştir. İki takipçi aynı pozitif yönde harekete başladıklarında, takipçiler başta biraz zorlanarak izleme yapmışlardır. Şekil 8d'de liderin başlangıç açısı 0 rad, 2. Robotun $\pi/4$ rad, 3. Robotun ise $\pi/4$ rad seçilerek bu durum gözlemlenmiştir. Üç robotun aynı pozitif yönde harekete başlamaları durumunda çarpışma gerçekleşmiştir. Şekil 8e'de üçünün de başlangıç açıları $\pi/4$ rad seçilerek bu durum gözlemlenmiştir.

3.5 İstenilen Mesafeler (I12d, I13d, I23d)

Bu bölümde robotların hareketi boyunca birbirlerine göre olmasının istenildiği mesafeler çeşitli değerler için uygulanmıştır ve robotların hareketleri gözlemlenmiştir.



Şekil 9. İstenilen Mesafelerin Değiştirilmesi Durumunda Robotların İzlediği Yollar

İstenen mesafelerin -5 birim'den 50 birim'e kadar değiştirildiğinde izlemenin bozulmadığı, sadece çok fazla seçilmesi durumunda takipçilerin biraz daha yavaş hareket ettiği gözlemlendi. Şekil 9a'da 0.3 birim, 9b'de 0.1 birim, 9c'de 0 birim, 9d'de 5 birim, 9e'de 50 birim, 9f'de -5 birim olarak seçilmiştir.

3.6 İstenilen Ψ Açıları (Robotların Birbirlerine Göre Yönelimleri)

Bu bölümde robotların hareketi boyunca birbirlerine göre olmasının istenildiği mesafeler çeşitli değerler için uygulanmıştır ve robotların hareketlerinde herhangi bir değişikliğin olmadığı gözlemlenmiştir.

4. Bulgular

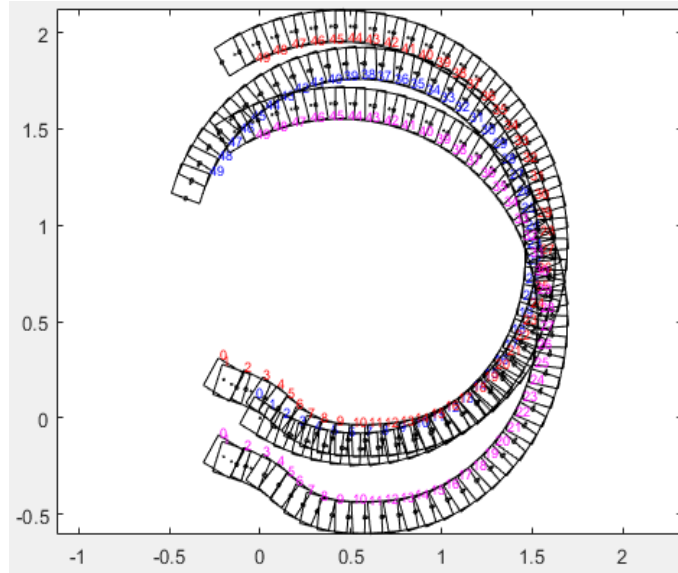
Çeşitli başlangıç değerleri ile yapılan, $l - \Psi$ ve $l - l$ kontrol kurallarının uygulandığı üç robotun olduğu simülasyonlarda, takibin bazı başlangıç değerlerinde daha iyi yapıldığı, bazı başlangıç değerlerinde de takibin iyi yapılamadığı ya da hiç yapılmadığı gözlemlenmiştir. Formasyon kontrolünde:

- takipçilerin liderden daha düşük hızda başladığı,
- liderin en önde olduğu,
- 2. Robotun liderin arkasında 3. Robotun da hem liderin hem de 2. Robotun arkasında harekete başladığı,
- takipçilerin liderinkinden daha büyük açısal hıza sahip olduğu,
- üç robotun da aynı negatif yönde harekete başladığı durumlarda

takibin çok iyi yapıldığı gözlemlenmiştir. Takibin en iyi yapıldığı optimal başlangıç değerleri Tablo 1'de ve bu değerlerle takip de Şekil 10'da verilmiştir.

Tablo 1. Optimal Başlangıç Değerleri

Değişken İsmi	Başlangıç Değeri	Birim
$x_2(0)$	-0.2	birim
$y_2(0)$	0.2	birim
$x_3(0)$	-0.2	birim
$y_3(0)$	-0.2	birim
v_1	0.1	birim/s
$v_2(0)$	0.05	birim/s
$v_3(0)$	0.05	birim/s
ω_1	0.1	rad/s
$\omega_2(0)$	0.2	rad/s
$\omega_3(0)$	0.2	rad/s
$\Theta_1(0)$	$-\pi/6$	rad/s
$\Theta_2(0)$	$-\pi/6$	rad/s
$\Theta_3(0)$	$-\pi/6$	rad/s
l_{12}^d	0.5	birim
l_{13}^d	0.5	birim
l_{23}^d	0.5	birim
Ψ_{12}^d	$-\pi/4$	rad/s
Ψ_{13}^d	$-\pi/4$	rad/s

**Şekil 10.** Optimal Başlangıç Değerleri İle Robotların İzlediği Yollar

5. Sonuç

(Desai vd., 1998, Desai vd., 2001) çalışmasında, holonomik olmayan mobil robotlara $l-l$ ve $l-\Psi$ kontrol Tekniği uygulandığında, çarpışmadan kaçınmak için Şekil 2’de gösterilen parametrelerden l_{12} , l_{13} ve $l_{23} > 2d$ şartının sağlanması gerektiğini söylemişlerdir. Bunun haricinde (Desai vd., 1998, Desai vd., 2001) çalışmalarında formasyon ile ilgili formasyon geometrisi veya formasyon başlangıç koşulları hakkında herhangi bir kısıt belirtilmemiştir. Bu makalede, bir lider ve iki takipçi robot için, çeşitli başlangıç koşullarında ilgili formasyon kontrolü simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Robotların hareketlerine başlamadan önce, buldukları pozisyon, birbirlerine göre yönelimler, robotların kendi açıları, birbirlerine göre konumları, başlangıçtaki açısal ve çizgisel hızları çeşitli değerler için denenmiştir. Bu başlangıç parametrelerinin bazı değerlerinde kontrolün ve izlemenin yapılmadığı ve takipçilerin takipten saptandığı gözlemlenmiştir. Bu değerlerin hangi aralıklarda olduğu çalışmada verilmiştir. Formasyon geometrisi ve formasyon başlangıç koşullarının, (Desai vd., 1998, Desai vd., 2001)’de önerilen $l-l$ ve $l-\Psi$ kontrol tekniğinin başarılı bir şekilde çalışıp çalışmamasını doğrudan etkilediği gösterilmiştir.

Referanslar

- Desai, J. P., Ostrowski, J., & Kumar, V. (1998). Controlling formations of multiple mobile robots. *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.98CH36146)*, 4, 2864–2869 c.4. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1998.680621>
- Desai, J. P., Ostrowski, J. P., & Kumar, V. (2001). Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17(6), 905–908. <https://doi.org/10.1109/70.976023>
- Edwards, D. B., Bean, T. A., Odell, D. L., & Anderson, M. J. (2004). A leader-follower algorithm for multiple AUV formations. *2004 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (IEEE Cat. No.04CH37578)*, 40–46. <https://doi.org/10.1109/AUV.2004.1431191>
- Eren, T., Whiteley, W., Anderson, B. D. O., Morse, A. S., & Belhumeur, P. N. (2005). Information structures to secure control of rigid formations with leader-follower architecture. *Proceedings of the 2005, American Control Conference, 2005.*, 2966–2971 c. 4. <https://doi.org/10.1109/ACC.2005.1470425>
- Eren, Tolga. (2012). Formation shape control based on bearing rigidity. *International Journal of Control*, 85(9), 1361–1379. <https://doi.org/10.1080/00207179.2012.685183>
- Fierro, R., Belta, C., Desai, J. P., & Kumar, V. (2001). On controlling aircraft formations. *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.01CH37228)*, 2, 1065–1070 c.2. <https://doi.org/10.1109/CDC.2001.981026>
- Flores-Resendiz, J. F., & Aranda-Bricaire, E. (2020). A General Solution to the Formation Control Problem Without Collisions for First-Order Multi-Agent Systems. *Robotica*, 38(6), 1123–1137. <https://doi.org/10.1017/S0263574719001280>
- Giulietti, F., Pollini, L., & Innocenti, M. (2000). Autonomous formation flight. *IEEE Control Systems Magazine*, 20(6), 34–44. <https://doi.org/10.1109/37.887447>
- Gosiewski, Z., & Ambroziak, L. (2012). Formation Flight Control Scheme for Unmanned Aerial Vehicles. İçinde K. Kozłowski (Ed.), *Robot Motion and Control 2011* (ss. 331–340). Springer London.
- Hirzinger, G., Brunner, B., Dietrich, J., & Heindl, J. (1994). ROTEX-the first remotely controlled robot in space. *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2604–2611 c.3. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1994.351121>
- Hua, Y., Dong, X., Hu, G., Li, Q., & Ren, Z. (2019). Distributed Time-Varying Output Formation Tracking for Heterogeneous Linear Multiagent Systems With a Nonautonomous Leader of Unknown Input. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 64(10), 4292–4299. <https://doi.org/10.1109/TAC.2019.2893978>
- Li, Z., Tang, Y., Huang, T., & Kurths, J. (2019). Formation Control with Mismatched Orientation in Multi-Agent Systems. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 6(3), 314–325. <https://doi.org/10.1109/TNSE.2018.2851199>
- Ma, H.-J., Yang, G.-H., & Chen, T. (2021). Event-Triggered Optimal Dynamic Formation of Heterogeneous Affine Nonlinear Multiagent Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 66(2), 497–512. <https://doi.org/10.1109/TAC.2020.2983108>
- Meng, Y., Chen, Q., Chu, X., & Rahmani, A. (2019). Maneuver Guidance and Formation Maintenance for Control of Leaderless Space-Robot Teams. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 55(1), 289–302. <https://doi.org/10.1109/TAES.2018.2850382>
- Skjetne, R., Moi, S., & Fossen, T. I. (2002). Nonlinear formation control of marine craft. *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, 2002.*, 2, 1699–1704 c.2. <https://doi.org/10.1109/CDC.2002.1184765>
- Wang, D., & Fu, M. (2019). Adaptive Formation Control for Waterjet USV With Input and Output Constraints Based on Bioinspired

Neurodynamics. *IEEE Access*, 7, 165852–165861. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953563>

Wang, X., Ni, W., & Wang, X. (2012). Leader-Following Formation of Switching Multirobot Systems via Internal Model. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 42(3), 817–826. <https://doi.org/10.1109/TSMCB.2011.2178022>

Wen, G., Chen, C. L. P., & Liu, Y. (2018). Formation Control With Obstacle Avoidance for a Class of Stochastic Multiagent Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(7), 5847–5855. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2782229>

Yang, X., & Fan, X. (2019). Robust Formation Control for Uncertain Multiagent Systems With an Unknown Control Direction and Disturbances. *IEEE Access*, 7, 106439–106452. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932234>



The Synthesis and Anticancer Activities of Ferrocenyl Chalcones; Drug-Likeness Calculations

Emine Albayrak Sarıca¹ , Özer Işıl¹ , Mutluhan Bıyıkoglu² , Ayşe Sahin Yaglıoglu³ , Adnan Bulut¹ 

¹Department of Chemistry, Kırıkkale University, 71450, Yahşihan, Kırıkkale, TURKEY

²Refinery and Petrochemistry Technology, Kırıkkale University, 71450, Yahşihan, Kırıkkale, TURKEY

³Department of Chemistry and Chemical Process Technology, Amasya University, 05186, Amasya, TURKEY

Başvuru/Received: 27/03/2021

Kabul / Accepted: 05/06/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 18/06/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Abstract

A series of **1-8** different ferrocenyl chalcones were synthesized through the Claisen–Schmidt condensation and the Friedel–Crafts acylation. Their structures were confirmed by means of ¹H, ¹³C NMR and FT–IR. The cytotoxic and antiproliferative activities of the chalcones were screened against HeLa (cervix cancer) and PC3 (prostate cancer) cell lines. They showed excellent anticancer activities especially against PC3 cell even at very low concentration (5 µM). Also, their physicochemical properties, drug-likeness calculations and the rule of five (RO5) were investigated.

Key Words

“Ferrocene, Chalcone, PC3, HeLa, Anti-cancer, Drug-likeness”

1. Introduction

Chalcones can be defined as aromatic enones i.e. 1,3-diphenyl-2-propen-1-one derivative. Due to conjugated and delocalized aromatic π electrons, they are colorful. Thus, they have excellent spectral properties. For example, their fluorescent properties were used in biochemical application (Tomasch et al., 2012). The Claisen–Schmidt condensation is most widely used method for ferrocenyl chalcone synthesis (Smith & Paulsen, 1954). Cross-Coupling reaction is another common method for chalcone synthesis (Zou et al., 2007). Microwave irradiation method can be given as an alternative method for chalcone synthesis (Kakati & Sarma, 2011). Chalcones can also be prepared by the Friedel–Crafts acylation (Shotter et al., 1978).

The inherent cyclization ability of chalcone allows using as precursor for many cyclization reactions such as flavonoids and isoflavonoids (Horborne et al., 1975). Another cyclization undergoes via Michael addition and 1,2 addition reaction afforded 1,5-benzothiazepines and/or 1,4-benzothiazines (Prakash et al., 2007). Also, Michael addition of chalcone is widely studied (Zhuang et al., 2017). Many natural compounds containing chalcone has been reported (fig. 1).

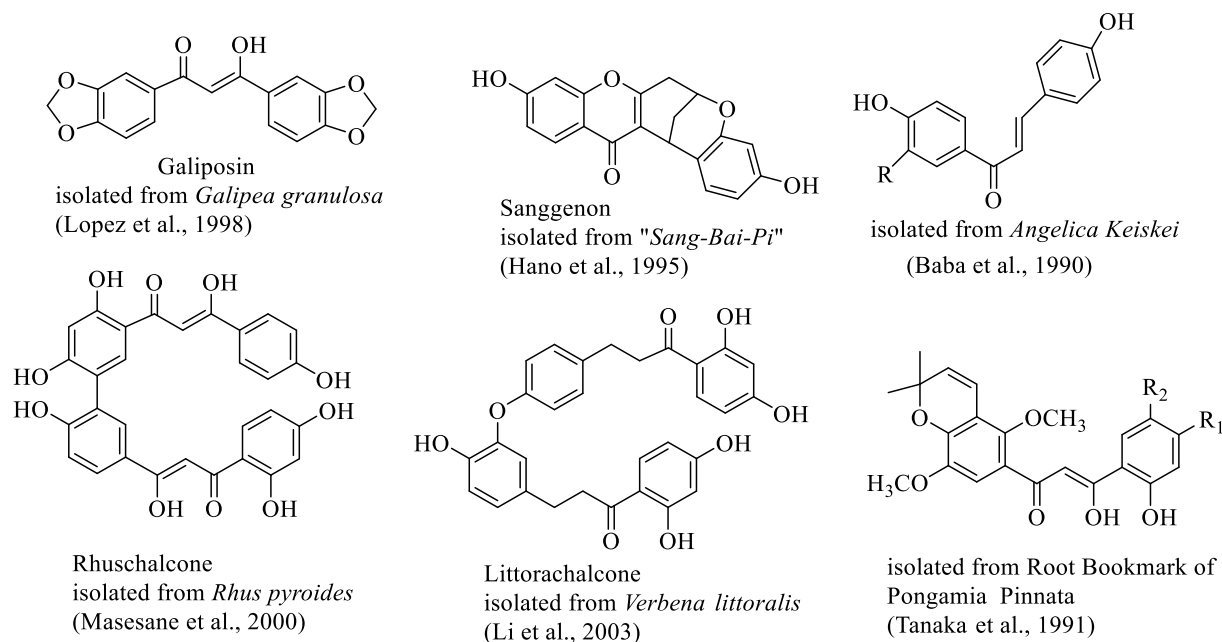


Figure 1. Some natural compounds containing chalcone unit

Given that chalcone containing compounds exhibit a broad range of therapeutic activities, several reports describing biological activities of chalcones have been reported. Boumendjel et al. reviewed the chalcones showing anticancer activities (Boumendjel et al., 2009). It has been observed that some chalcones have multiple important biological activities. For example, Isoliquiritigenin isolated from Nepalese propolis shows anticancer, anti-oxidant, cancer chemopreventer and anti-inflammation (Zhuang et al., 2017).

On the other hand, ferrocenyl chalcone synthesis and their biological evaluations were well studied. Yadav et al. synthesized 16 ferrocenyl chalcone through using microwave in high yields and screened them for antifungal against *Sclerotium rolfsii* and *Alternaria solani* (Yadav et al., 2019). They have found that their chalcones showed good antifungal activity. Similar antifungal activities were reported by Muskinja et al. for different ferrocenyl chalcones (Muskinja et al., 2016). Janka et al. prepared novel ferrocenyl chalcones and screened their anti-cancer activities against HeLa, MCF7, A549 and MDA cells and reported that they have potential antitumor activity (Janka et al., 2015).

Cancer is a large family of diseases caused by uncontrolled cell divisions and the fear of cancer is an ever-present in our daily life. Prostate cancer is the second most common cancer-related death in men. On the other hand, cervical cancer is the second most common cancer in women worldwide (Petignat et al., 2007). About half million patients are newly diagnosed annually and more than 200,000 woman die due to cervical cancer (Parkin et al., 2005).

In this study, firstly a series of 1-8 different ferrocenyl chalcones were synthesized through the Claisen–Schmidt condensation and the Friedel–Crafts acylation and confirmed to their structures by means of ^1H , ^{13}C NMR and FT–IR. Secondly, The cytotoxic and antiproliferative activities of the chalcones were screen against HeLa (cervix cancer) and PC3 (prostate cancer) cell lines. Also, their physicochemical properties, drug-likeness calculations and the rule of five (RO5) were investigated.

2. Material Method

2.1. General

All chemicals were supplied from Sigma-Aldrich Company. ^1H and ^{13}C NMR spectra of CDCl_3 solutions were measured on a Bruker spectropspin Avance DPX-400 Ultra shield instrument at 400 MHz and 100 MHz respectively (standard TMS). FT-IR spectra were obtained on Bruker Platinum ATR-IR instrument and reported in reciprocal centimeters (cm^{-1}). All solvents were dried and distilled prior to use. Products were separated by flash column chromatography on Silica Gel 60 (Merck, 230–400 mesh ASTM). TLC analyses were applied on 250 μm Silica Gel 60 F254 plates. HeLa (human cervical cancer), PC3 (human prostate cancer cell) cancer cell lines (ATCC®, Manassas, VA, USA) were purchased in this study. Cell proliferation BrdU ELISA kits were provided from Roche (Germany), while 5-fluorouracil (5-FU) and others were from Sigma and Merck. The results of investigation in vitro are means \pm SD of six measurement. Differences between groups were tested with ANOVA, Duncan. p values of <0.01 were considered as significant. IC_{50} values were determined using ED50plus v1.0.

2.2. General Procedure for Acylation of Ferrocene

1.0 g (5.38 mmol) ferrocene and 0.98 g (5.91 mmol) cinnamoyl chloride were mixed in 6 mL of CH_2Cl_2 at 0 °C for 1/2 hours. Next, 16.14 mL of EtAlCl_2 (16.14 mmol, 1 M stock solution in hexane) was added by dropwise at 0 °C for 15 min. After mixing another 3 hours at same temperature, the solution was poured into 25 mL of sat. NH_4Cl solution. CH_2Cl_2 layer was extracted and dried over MgSO_4 . The flash column chromatography was applied with the eluent system (7:1, Hex:EtAc) for purification. 0.54 g **1** was obtained (yield, 32%).

2.2.1. Cinnamoyl Ferrocene (1)

(32% yield), ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ 7.73 (d, $J = 15.7$ Hz, 1H), 7.59 (dd, $J = 7.3, 2.0$ Hz, 2H), 7.36 (m, 3H), 7.06 (d, $J = 15.7$ Hz, 1H), 4.85 (s, 2H), 4.53 (s, 2H), 4.16 (s, 5H). ^{13}C NMR (101 MHz, CDCl_3) δ 192.7, 140.9, 135.2, 130.1, 129.0, 128.3, 123.0, 80.6, 72.8, 70.1, 69.6. IR (cm^{-1}) 1649, 1593, 1456, 1240, 1079, 979, 759, 687, 484.

2.2.2. Crotonoyl Ferrocene (2)

(82% yield), ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ 7.05 (dq, $J = 13.8, 6.9$ Hz, 1H), 6.54 (dd, $J = 15.2, 1.6$ Hz 1H), 4.82 (s, 2H), 4.53 (s, 2H), 4.19 (s, 5H). ^{13}C NMR (101 MHz, CDCl_3) δ 193.1, 140.7, 128.1, 80.1, 72.5, 70.0, 69.6, 18.1. IR (cm^{-1}) 1660, 1608, 1458, 1244, 980, 895, 823, 502, 483.

2.3. General Procedure for Claisen-Schmidt Condensation

0.5 g (2.19 mmol) acetylferrocene and 0.147 g (2.63 mmol) KOH were dissolved in 13 mL ethanol. After mixing 15 min, 0.214 g (2.19 mmol) of *p*-methoxybenzaldehyde in 13 mL ethanol was added by dropwise into the solution. Next, it was refluxed for 2 hours. Finally, it was hydrolyzed with sat. NH_4Cl solution (15 mL) and extracted with CH_2Cl_2 (25 mL). The product **3** was easily purified with the flash column chromatography (7:1, Hex:EtAc, 0.26 g 30 % yield).

2.3.1. (*E*)-1-ferrocenyl-3-(4-methoxyphenyl)prop-2-en-1-one (3)

(30% yield), ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ 7.70 (d, $J = 15.6$ Hz, 1H), 7.54 (d, $J = 8.7$ Hz, 1H), 6.95 (d, $J = 15.6$ Hz, 1H), 6.88 (d, $J = 8.7$ Hz, 1H), 4.84 (s, 2H), 4.50 (s, 2H), 4.14 (s, 5H), 3.79 (s, 3H). ^{13}C NMR (101 MHz, CDCl_3) δ 209.9, 161.4, 140.4, 129.9, 120.7, 114.2, 80.8, 72.6, 70.1, 69.7, 55.4. IR (cm^{-1}) 1646, 1580, 1509, 1453, 1239, 1172, 1078, 1021, 995, 826, 504, 483.

2.3.2. (*E*)-1-ferrocenyl-3-(2-furan-2-yl)prop-2-en-1-one (4)

(56% yield), ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ 7.47 (d, $J = 15.0$ Hz, 2H), 6.95(d, $J = 15.4$ Hz, 1H), 6.61(d, $J = 3.3$ Hz, 1H), 6.44 (dd, $J = 3.1, 1.7$ Hz, 1H), 4.83 (s, 2H), 4.51 (s, 2H), 4.14 (s, 5H). ^{13}C NMR (101 MHz, CDCl_3) δ 192.7, 151.8, 144.3, 127.1, 120.7, 115.3, 112.4, 80.7, 72.7, 70.1, 69.7. IR (cm^{-1}) 1649, 1589, 1549, 1449, 1374, 1282, 1072, 973, 817, 756, 668, 506, 483.

2.3.3. (*E*)-1-ferrocenyl-3-(4-chlorophenyl)prop-2-en-1-one (5)

(26% yield), ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ 7.67 (d, $J = 15.7$ Hz, 1H), 7.51 (d, $J = 8.5$ Hz, 2H), 7.33 (d, $J = 8.5$ Hz, 2H), 7.02 (d, $J = 15.5$ Hz, 1H), 4.84 (s, 2H), 4.53 (s, 2H), 4.14 (s, 5H). ^{13}C NMR (101 MHz, CDCl_3) δ 139.4, 129.4, 129.3, 129.2, 123.4, 72.9, 70.1, 70.0, 69.7. IR (cm^{-1}) 1650, 1594, 1456, 1239, 1094, 985, 815, 482.

2.3.4. (*E*)-1-ferrocenyl-3-(2-thiophen-2-yl)prop-2-en-1-one (6)

(55% yield), ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ 7.83 (d, $J = 15.3$ Hz, 1H), 7.33 (d, $J = 5.1$ Hz, 1H), 7.28 (d, $J = 3.5$ Hz, 1H), 7.02 (dd, $J = 5.0, 3.6$ Hz, 1H), 6.85 (d, $J = 15.3$ Hz, 1H), 4.83 (s, 2H), 4.51 (s, 2H), 4.14 (s, 5H). ^{13}C NMR (101 MHz, CDCl_3) δ 192.5, 140.7, 133.3, 131.4, 128.3, 127.9, 122.0, 80.6, 72.8, 70.1, 69.7. ^{13}C NMR (101 MHz, CDCl_3) δ 192.5, 140.7, 133.3, 131.4, 128.3, 127.9, 122.0, 80.6, 72.8, 70.1, 69.7. IR (cm^{-1}) 1641, 1580, 1456, 1378, 1279, 1075, 972, 827, 705, 479.

2.3.5. (*E*)-1-ferrocenyl-3-(4-bromophenyl)prop-2-en-1-one (7)

(41% yield), ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ 7.65 (d, $J = 15.7$ Hz, 1H), 7.47 (m, 4H), 7.03 (d, $J = 15.6$ Hz, 1H), 4.83 (s, 2H), 4.54 (s, 2H), 4.15 (s, 5H). ^{13}C NMR (101 MHz, CDCl_3) δ 192.9, 139.5, 134.1, 132.2, 129.6, 124.2, 123.5, 80.5, 72.9, 70.1, 69.8. IR (cm^{-1}) 1651, 1595, 1456, 1240, 1071, 985, 815, 480.

2.3.6. (*E*)-3-(naphthalen-1-yl)-1-ferrocenylprop-2-en-1-one (8)

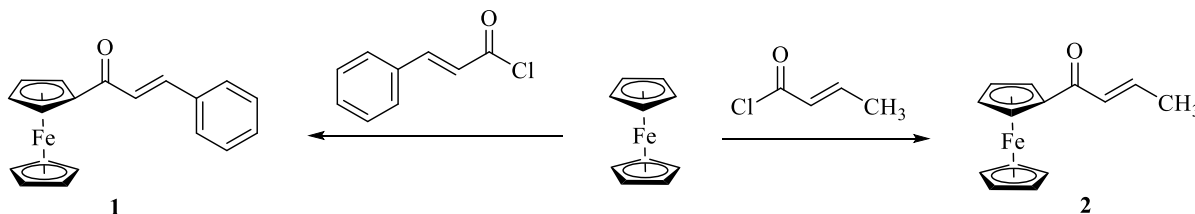
(50% yield), ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ 8.56 (d, $J = 15.4$ Hz, 1H), 8.24 (d, $J = 8.4$ Hz, 1H), 7.83 (m, 3H), 7.49 (m, 3H), 4.88 (s, 2H), 4.54 (s, 2H), 4.17 (s, 5H). ^{13}C NMR (101 MHz, CDCl_3) δ 192.9, 137.8, 133.8, 132.8, 131.8, 130.4, 128.7, 126.9, 126.3, 125.9, 125.4, 124.8, 123.7, 80.6, 72.9, 70.2, 69.8, 29.7. IR (cm^{-1}) 1639, 1569, 1450, 1345, 1256, 1075, 986, 793, 774, 484.

3. Result and Discussions

Within this work 8 ferrocenyl chalcones were synthesized and tested the anticancer activities against PC3 and HeLa cells. In addition, the drug-likeness and physicochemical properties of molecules were calculated.

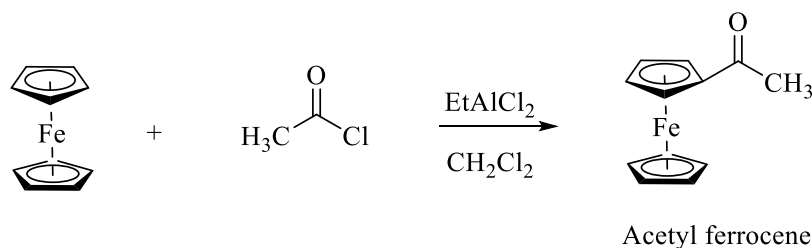
3.1. Chemistry

The synthetic part might be divided into two sections as follows; Claisen–Schmidt condensation and Friedel–Crafts acylation. In the first part, the chalcones 1 and 2 were readily obtained from ferrocene and corresponding acyl chlorides by Friedel–Crafts acylation (scheme 1) (Dogan et al., 2005).



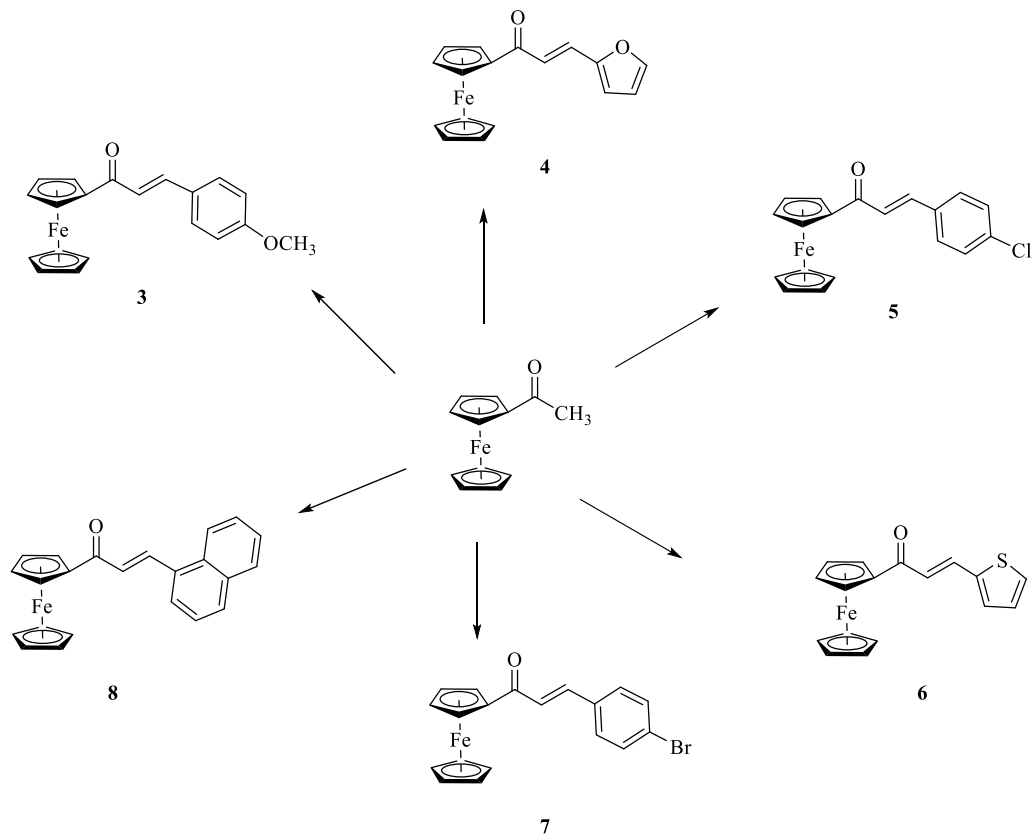
Scheme 1. Friedel–Crafts Ferrocenyl chalcone synthesis

In the second part, acetylferrocene was synthesized from ferrocene and acetyl chloride at 0°C mediated with EtAlCl_2 (adopted from the Dogan group procedure (Dogan et al., 2005)). The pure and sole product was easily purified through flash column in high yields (up to 99 % yield) (Scheme 2).



Scheme 2. Acetyl ferrocene synthesis in the presence of alkyl Lewis acid, EtAlCl_2

Next, acetylferrocene was converted into the chalcones by Claisen–Schmidt condensation using appropriate aldehydes and pure colorful products were easily via flash column in high yields (up to 90 %) (Scheme 3).



Scheme 3. Ferrocenyl chalcone synthesis via Claisen–Schmidt condensation

3.2. Anticancer Activity Results

Anticancer activities of the chalcones (**1-8**) and 5-Fluorouracil (**5-FU**) against HeLa and PC3 cells were screened at four different concentrations (5, 25, 50 and 100 μM). IC_{50} values of compounds (**1-8**) and **5-FU** against HeLa and PC3 cells are depicted in the Table 1. The data presented in the Tables 1 revealed that all the chalcones (**1-8**) provided better IC_{50} inhibition activities than the standard drug (5-Fu) against PC3 cell. Among the screened the chalcones against PC3 cell, **7** gave the best inhibition with the IC_{50} value of 22.86 μM according to the standard drug with the IC_{50} value of 37.36 μM .

Table 1. IC_{50} values of the compounds (**1-8**) and 5-FU

Sample name	PC3 cell (μM)	HeLa cell (μM)
1	26.38 \pm 0.10	2.40 \pm .01
2	24.45 \pm 0.12	2.29 \pm 0.02
3	28.04 \pm 0.05	2.50 \pm 0.05
4	26.45 \pm 0.24	2.46 \pm 0.01
5	24.67 \pm 0.17	2.53 \pm 0.03
6	24.04 \pm 0.11	2.42 \pm 0.01
7	22.86 \pm 0.28	2.45 \pm 0.03
8	27.99 \pm 0.30	2.81 \pm 0.01
5-FU	37.36 \pm 0.30	2.50 \pm 0.01

Similarly, all the chalcones except **8** had also better anticancer activities than 5FU against HeLa cell (table 1). To illustrate, the IC_{50} value of **2** (2.29 μM) was the lower than 5-FU IC_{50} value (IC_{50} = 2.50 μM). As can be seen in Figure 1A and 1B, **1-8** had better anticancer activity than the 5-FU at all concentrations (5, 25, 50 and 100 μM) against both PC3 and HeLa cells. Notably, all the chalcones showed much better activity than 5-FU at the low concentration (5 μM) against PC3 cell. Also, the chalcone **1-8** against HeLa cell showed more than 10 times activity than against PC3 (Table 1). In addition, **1**, **2** and **4** showed better activity than the 5-FU at the lowest dose (5 μM) against HeLa cell (Figure 2B).

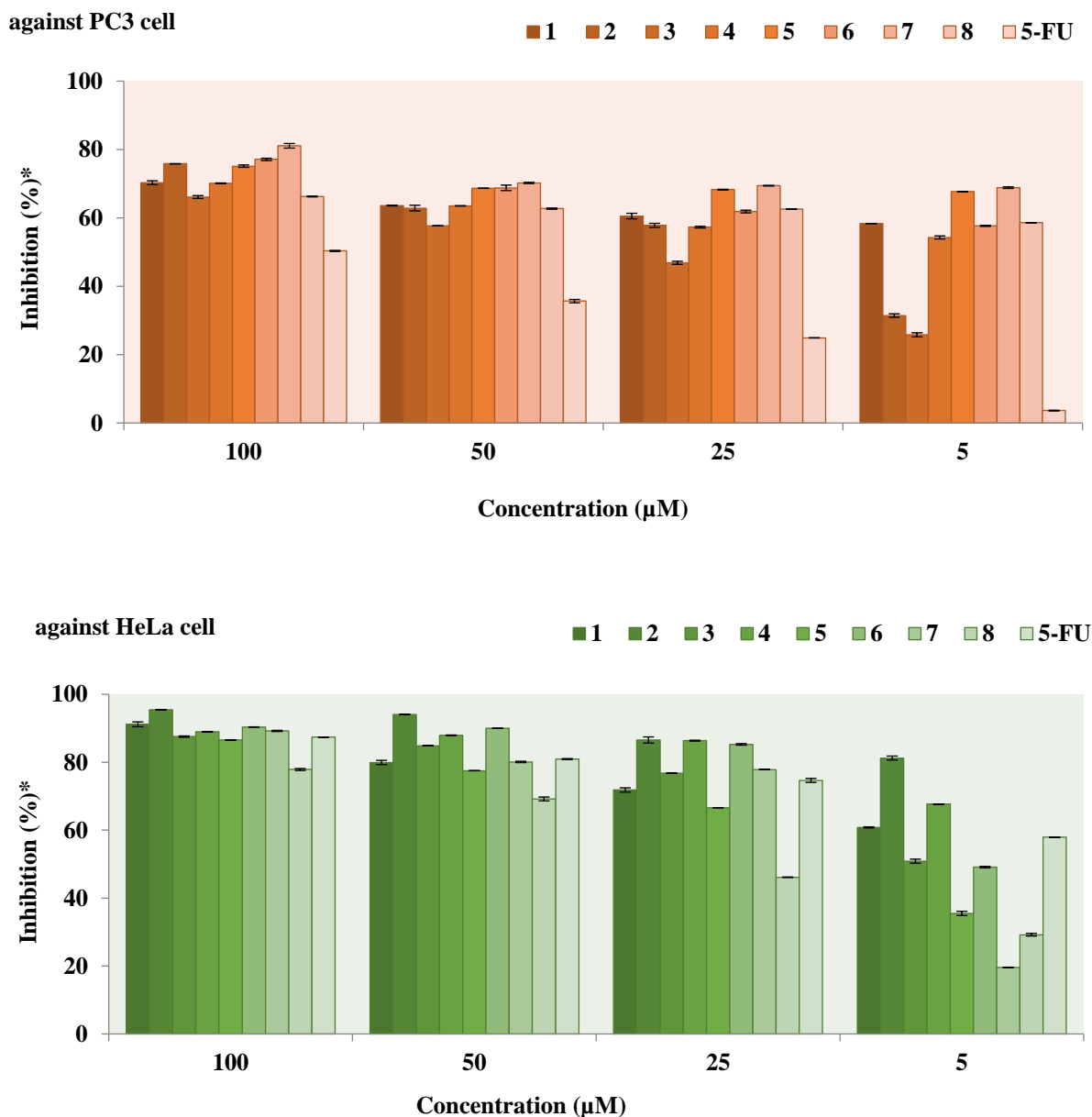


Figure 2. Anticancer activity of (**1-8**) and **5-FU** against PC3 (A) and HeLa (B) cells lines *Data are presented as mean \pm SD (n=6). Statistical significant difference ($p < 0.01$) was observed between treatments (ANOVA, Duncan).

3.3. Drug Likeness Properties

Before starting the synthesis or testing process as a drug, some theoretical calculations are made such as the Lipinski rule, physicochemical properties, water solubility, BBB score and lipophilicity. All the chalcones (**1** to **8**) obey the Lipinski's rule as explained below. They have hydrogen bond acceptors (HBA) and donors (HBD) within the Lipinski's rules, $n\text{-ON} < 10$ and $n\text{-OHNH} < 5$. The calculations of $\log P$ proved that they are smaller than 5 that is within the Lipinski's rules (Table 2). According to another Lipinski rule, the molecular weight of compounds should be less than 500 gr/mol. All the chalcones have molecular weights between 254.11 to 395.07 g/mol. The Blood-Brain Barrier (BBB) score is valuable physicochemical information which can avoid toxicities of drugs and it should be less than 6.0. Fortunately, the BBB score of (**1-8**) are ranges between from 4.32 to 4.98. On the other hand, synthetic accessibility and topological polar surface area (TPSA) must be smaller than 10 and 70 \AA^2 respectively. And it was calculated that the synthetic accessibilities and topological polar surface areas (TPSA) of the chalcones are smaller than 5 and 70 \AA^2 respectively (table 2 and figure 2). Another important property for the drug-likeness calculation is the solubility and it was found that all the chalcones are either soluble or moderately soluble. The solubilities of the chalcones (**1** to **8**) are between -5.49 and -3.25 (The solubility ($\log S$) scale value ranges between -10 (insoluble), -6 (poorly soluble), -4 (soluble), -2 (very soluble) and 0 (highly soluble)) (table 2). The skin permeation results proved that the chalcones (**1** to **8**) are good anti-inflammatory with the $\log K_p$ values between -5.55 and -4.36 cm/s.

According to Lipinski's rule of five; the chalcones (**1-8**) could be a new potential anticancer agent according to calculated data (Table 2 and Table 3). The drug-likeness of **1-8** were found to have satisfactory "Bioavailability radar" results which implies they can be can be good candidates as oral drugs (Figure 3).

Table 2. Physicochemical properties, lipophilicity, solubility, pharmacokinetics, drug-likeness and medicinal chemistry of the chalcones (**1-8**) predicted using Swiss ADME

No	Physicochemical properties	Lipophilicity	Water solubility	Pharmacokinetics	Drug likeness	Medicinal Chemistry
1	Formula:C19H16FeO	Log P _{o/w} (iLOGP): 0.00	Log S (ESOL): -4.57 Solubility:8.44e-03 mg/ml; 2.67e-05mol/l	GI absorption: High BBB permeant:Yes P-gpsubstrate:No CYP1A2 inhibitor:No CYP2C19 inhibitor:Yes CYP2C9 inhibitor:Yes CYP2D6 inhibitor:No CYP3A4 inhibitor:No Log Kp (skin permeation):-4.97 cm/s	Lipinski: Yes Ghose: Yes Veber: Yes Egan: Yes Muegge: No; 1 violation: Heteroatoms< 2 Bioavailability Score: 0.55	PAINS: = 0 alert Brenk: 2 alerts: heavy_metal , Michael_acc eptor_1 Leadlikeness : No;1 violation: XLOGP3>3.5 Synthetic accessibility: 4.27
	Molecular weight: 316.17 g/mol	Log P _{o/w} (XLOGP3):4.59	Class:Moderately soluble			
	Num. heavy atoms: 21	Log P _{o/w} (WLOGP):4.44	Log S (Ali): -4.67 Solubility: 6.72e-03 mg/ml; 2.12e-05mol/l			
	Num. arom.heavy atoms: 6	Log P _{o/w} (MLOGP):3.93	Class: Moderately soluble			
	Fraction Csp3:0.11	Log P _{o/w} (SILICOS-IT):2.50	Log S(SILICOS-IT):-3.27 Solubility: 1.69e-01 mg/ml; 5.36e-04mol/l			
	Num. rotatable bonds: 5	Consensus	Class: Soluble			
	Num. H-bond acceptors: 1	Log P _{o/w} : 3.09				
	Num. H-bond donors: 0					
	Molar Refractivity: 83.49					
	TPSA: 17.07 Å ²					
2	Formula:C14H14FeO	Log Po/W (iLOGP): 0.00	Log S (ESOL): -3.25 Solubility:1.43e-01 mg/ml; 5.63e-04mol/l	GI absorption: High BBB permeant:Yes P-gpsubstrate:No CYP1A2 inhibitor:No CYP2C19 inhibitor:No CYP2C9 inhibitor:No CYP2D6 inhibitor:No CYP3A4 inhibitor:No Log Kp (skin permeation):-5.49 cm/s	Lipinski: Yes Ghose: Yes Veber: Yes Egan: Yes Muegge: No;1 violation: Heteroatoms< 2 Bioavailability Score: 0.55	PAINS: = 0 alert Brenk: 2 alerts: heavy_metal , Michael_acc eptor_1 Leadlikeness : Yes Synthetic accessibility: 4.36
	Molecular weight: 254.11g/mol	Log Po/W (XLOGP3):3.33	Class:Soluble			
	Num. heavy atoms: 16	Log Po/W (WLOGP):3.41	Log S (Ali): -3.37 Solubility: 1.10e-01 mg/ml; 4.31e-04mol/l			
	Num. arom.heavy atoms: 0	Log Po/W (MLOGP):2.95	Class: Soluble			
	Fraction Csp3:0.21	Log Po/W (SILICOS-IT):1.33	Log S(SILICOS-IT):-1.17 Solubility: 1.74e+01 mg/ml; 6.84e-02mol/l			
	Num. rotatable bonds: 4	Consensus	Class: Soluble			
	Num. H-bond acceptors: 1	Log Po/W: 2.21				
	Num. H-bond donors: 0					
	Molar Refractivity: 63.01					
	TPSA: 17.07 Å ²					

Table 2 (cont). Physicochemical properties, lipophilicity, solubility, pharmacokinetics, drug-likeness and medicinal chemistry of the chalcones (1-8) predicted using Swiss ADME

No	Physicochemical properties	Lipophilicity	Water solubility	Pharmacokinetics	Drug likeness	Medicinal Chemistry
3	Formula:C20H18FeO	Log Po/W (iLOGP): 0.00	Log S (ESOL): -4.88 Solubility:4.31e-03	GI absorption: High BBB permeant:Yes	Lipinski: Yes; 1 violation:	PAINS: = 0 alert
	Molecular weight: 330.20 g/mol	Log Po/W (XLOGP3):4.	mg/ml ; 1.31e-05 mol/l	P-gpsubstrate:Yes CYP1A2	MLOGP>4.15 Ghose: Yes	Brenk: 2 alerts:
	Num. heavy atoms: 22	96	Class:Moderately soluble	inhibitor:No CYP2C19	Veber: Yes Egan: Yes	heavy_metal ,
	Num. arom.heavy atoms: 6	Log Po/W (WLOGP):4.7 5	Log S (Ali): -5.06 Solubility: 2.90e-03	inhibitor:Yes CYP2C9	Muegge: No; 1 violation:	Michael_acc eptor_1
	Fraction Csp3:0.15	Log Po/W (MLOGP):4.1	mg/ml; 8.78e-06 mol/l	inhibitor:Yes CYP2D6	Heteroatoms< 2	Leadlikeness : No;1
	Num. rotatable bonds: 5	6	Class: Moderately soluble	inhibitor:No CYP3A4	Bioavailability Score: 0.55	violation: XLOGP3>3.
	Num. H-bond acceptors: 1	Log Po/W (SILICOS-IT):3.01	Log S(SILICOS-IT):- 3.65	inhibitor:No Log Kp (skin permeation):-4.79 cm/s		5 Synthetic accessibility: 4.37
	Num. H-bond donors: 0	Consensus	Solubility: 7.39e-02 mg/ml ; 2.24e-04 mol/l			
	Molar Refractivity: 88.45	Log Po/W: 3.38				
	TPSA: 17.07 Å ²		Class: Soluble			
4	Formula:C20H20FeO2	Log Po/W (iLOGP): 0.00	Log S (ESOL): -4.70 Solubility:6.94e-03	GI absorption: High BBB permeant:Yes	Lipinski: Yes Ghose: Yes	PAINS: = 0 alert
	Molecular weight: 348.22 g/mol	Log Po/W (XLOGP3):4.	mg/ml ; 1.99e-05 mol/l Class:	P-gpsubstrate: Yes CYP1A2	Veber: Yes Egan: Yes	Brenk: 3 alerts:
	Num. heavy atoms: 23	61	Moderately soluble	inhibitor:No CYP2C19	Muegge: Yes Bioavailability	heavy_metal ,
	Num. arom.heavy atoms: 6	Log Po/W (WLOGP):4.6 7	Log S (Ali): -4.89 Solubility: 4.51e-03	inhibitor:Yes CYP2C9	Score: 0.55	isolated_alke ne,
	Fraction Csp3:0.25	Log Po/W (MLOGP):3.5	mg/ml ; 1.30e-05 mol/l	inhibitor:No CYP2D6		michael_acc eptor_1
	Num. rotatable bonds: 6	8	Class: Moderately soluble	inhibitor:No CYP3A4		Leadlikeness : No; 1
	Num. H-bond acceptors: 2	Log Po/W (SILICOS-IT):2.95	Log S(SILICOS-IT):- 3.85	inhibitor:Yes Log Kp (skin permeation): -5.15 cm/s		violation: XLOGP3>3.
	Num. H-bond donors: 0	Consensus	Solubility: 4.94e-02 mg/ml; 1.42e-04 mol/l			5
	Molar Refractivity: 90.45	Log Po/W: 3.16				Synthetic accessibility: 4.30
	TPSA: 26.30 Å ²		Class: Soluble			

Table 2 (cont). Physicochemical properties, lipophilicity, solubility, pharmacokinetics, drug-likeness and medicinal chemistry of the chalcones (1-8) predicted using Swiss ADME

No	Physicochemical properties	Lipophilicity	Water solubility	Pharmacokinetics	Drug likeness	Medicinal Chemistry
5	Formula: C ₁₇ H ₁₄ FeO ₂	Log Po/W (iLOGP): 0.00	Log S (ESOL): -3.92 Solubility: 3.70e-02 mg/ml; 1.21e-04 mol/l	GI absorption: High BBB permeant: Yes P-gpsubstrate: No CYP1A2	Lipinski: Yes Ghose: Yes Veber: Yes Egan: Yes	PAINS: = 0 alert Brenk: 2 alerts:
	Molecular weight: 306.14 g/mol	Log Po/W (XLOGP3): 3.69	Class: Soluble	inhibitor: No CYP2C19	Muegge: Yes Bioavailability Score: 0.55	heavy_metal , michael_acc_eptor_1
	Num. heavy atoms: 20	Log Po/W (WLOGP): 4.03	Log S (Ali): -4.01 Solubility: 2.96e-02 mg/ml ; 9.67e-05 mol/l	inhibitor: Yes CYP2C9		
	Num. arom.heavy atoms: 5	Log Po/W (MLOGP): 2.57	Class: Moderately soluble	inhibitor: No CYP2D6		Leadlikeness : No; 1 violation:
	Fraction Csp ³ : 0.12	Log Po/W (SILICOS-IT): 1.87	Log S(SILICOS-IT): -2.49 Solubility: 9.91e-01 mg/ml; 3.24e-03 mol/l	CYP3A4 inhibitor: No Log Kp (skin permeation): -5.55 cm/s		XLOGP3 > 3.5 Synthetic accessibility: 4.31
	Num. H-bond acceptors: 2	Consensus	Class: Soluble			
	Num. H-bond donors: 0	Log Po/W: 2.43				
	Molar Refractivity: 75.75					
	TPSA: 30.21 Å ²					
	6	Formula: C ₁₉ H ₁₅ ClFeO	Log Po/W (iLOGP): 0.00	Log S (ESOL): -5.17 Solubility: 2.35e-03 mg/ml; 6.69e-06 mol/l	GI absorption: High BBB permeant: Yes P-gpsubstrate: Yes CYP1A2	Lipinski: Yes; 1 violation: MLOGP > 4.15 Ghose: Yes Veber: Yes	PAINS: = 0 alert Brenk: 2 alerts: heavy_metal ,
Molecular weight: 350.62 g/mol		Log Po/W (XLOGP3): 5.22	Class: Moderately soluble	CYP2C19 inhibitor: Yes	Egan: Yes Muegge: No;	heavy_metal , michael_acc_eptor_1
Num. heavy atoms: 22		Log Po/W (WLOGP): 5.10	Log S (Ali): -5.33 Solubility: 1.65e-03 mg/ml ; 4.72e-06 mol/l	inhibitor: Yes CYP2C9	Muegge: No; 2 violations: XLOGP3 > 5,	
Num. arom.heavy atoms: 6		Log Po/W (MLOGP): 4.43	Class: Moderately soluble	inhibitor: Yes CYP2D6	Heteroatoms < 2 Bioavailability Score: 0.55	Leadlikeness : No; 2 violations: MW > 350, XLOGP3 > 3.5
Fraction Csp ³ : 0.11		Log Po/W (SILICOS-IT): 3.13	Log S(SILICOS-IT): -3.87 Solubility: 4.77e-02 mg/ml ; 1.36e-04 mol/l	inhibitor: Yes CYP3A4 Log Kp (skin permeation): -4.73 cm/s		Synthetic accessibility: 4.21
Num. H-bond acceptors: 1		Consensus	Class: Soluble			
Num. H-bond donors: 0		Log Po/W: 3.57				
Molar Refractivity: 88.50						
TPSA: 17.07 Å ²						

Table 2 (cont). Physicochemical properties, lipophilicity, solubility, pharmacokinetics, drug-likeness and medicinal chemistry of the chalcones (**1-8**) predicted using Swiss ADME

No	Physicochemical properties	Lipophilicity	Water solubility	Pharmacokinetics	Drug likeness	Medicinal Chemistry
7	Formula: C17H14FeOS	Log Po/W (iLOGP): 0.00	Log S (ESOL): -4.41 Solubility: 1.26e-02 mg/ml; 3.91e-05 mol/l	GI absorption: High BBB permeant: Yes P-gp substrate: No CYP1A2	Lipinski: Yes; Ghose: Yes Veber: Yes Egan: Yes	PAINS: = 0 alert Brenk: 2 alerts:
	Molecular weight: 322.20 g/mol	Log Po/W (XLOGP3):4.	Class: Moderately soluble	inhibitor:No CYP2C19	Muegge: Yes Bioavailability	heavy_metal ,
	Num. heavy atoms: 20	Log Po/W (WLOGP):4.5	Log S (Ali): -4.98 Solubility: 3.41e-03 mg/ml; 3.41e-03 mol/l	inhibitor:Yes CYP2C9	Score: 0.55	michael_acc eptor_1
	Num. arom.heavy atoms: 5	0	Moderately soluble	inhibitor:Yes CYP2D6		Leadlikeness : No; 1
	Fraction Csp3:0.12	Log Po/W (MLOGP):3.5	Log S(SILICOS-IT): -2.54	inhibitor:No CYP3A4		violation: XLOGP3>3. 5
	Num. rotatable bonds: 5	0	Solubility: 9.36e-01 mg/ml; 2.90e-03 mol/l	inhibitor:No Log Kp (skin permeation):-5.21 cm/s		Synthetic accessibility: 4.32
	Num. H-bond acceptors: 1	Log Po/W (SILICOS- IT):3.12	Class: Soluble			
	Num. H-bond donors: 0	Consensus				
	Molar Refractivity: 81.36	Log Po/W: 3.09				
	TPSA: 45.31 Å ²					
8	Formula: C19H15BrFeO	Log Po/W (iLOGP): 0.00	Log S (ESOL): -5.49 Solubility: 1.29e-03 mg/ml; 3.25e-06 mol/l	GI absorption: High BBB permeant: Yes P-gp substrate: Yes CYP1A2	Lipinski: Yes; 1 violation: MLOGP>4.15 Ghose: Yes Veber: Yes	PAINS: = 0 alert Brenk: 2 alerts: heavy_metal
	Molecular weight: 395.07 g/mol	Log Po/W (XLOGP3):5.	Class: Moderately soluble	inhibitor:No CYP2C19	Egan: Yes	,
	Num. heavy atoms: 22	Log Po/W (WLOGP):5.2	Log S (Ali): -5.39 Solubility 1.61e-03 mg/ml ; 4.09e-06 mol/l	inhibitor:Yes CYP2C9	Muegge: No; 2 violations: XLOGP3>5, Heteroatoms< 2	michael_acc eptor_1 Leadlikeness : No; 2 violations:
	Num. arom.heavy atoms: 6	0	Class: Moderately soluble	inhibitor:Yes CYP2D6	Bioavailability	MW>350, XLOGP3>3. 5
	Fraction Csp3:0.11	Log Po/W (MLOGP):4.5	Log S(SILICOS-IT): -4.07	inhibitor:No CYP3A4	Score: 0.55	
	Num. rotatable bonds: 5	4	Solubility: 3.38e-02 mg/ml; 8.55e-05 mol/l	inhibitor:Yes Log Kp (skin permeation):-4.96 cm/s		Synthetic accessibility: 4.23
	Num. H-bond acceptors: 1	Log Po/W (SILICOS- IT):3.17	Class: Moderately soluble			
	Num. H-bond donors: 0	Consensus				
	Molar Refractivity: 91.19	Log Po/W: 3.64				
	TPSA: 17.07 Å ²					

The bioavailability radars of **1-8** were demonstrated on Figure 2. The optimal range was drawn as pentagonal pink (lipophilicity: LOGP between -0.7 and +5.0, size: MW between 150 and 500 g/mol, polarity: TPSA between 20 and 130 Å², solubility: log S not higher than 6, saturation: fraction of carbons in the sp³ hybridization not less than 0.25, and flexibility: no more than 9 rotatable bonds). According to the bioavailability radars and the smiles, the chalcones (**1-8**) can be accepted orally bioavailable (figure 2 and table 3).

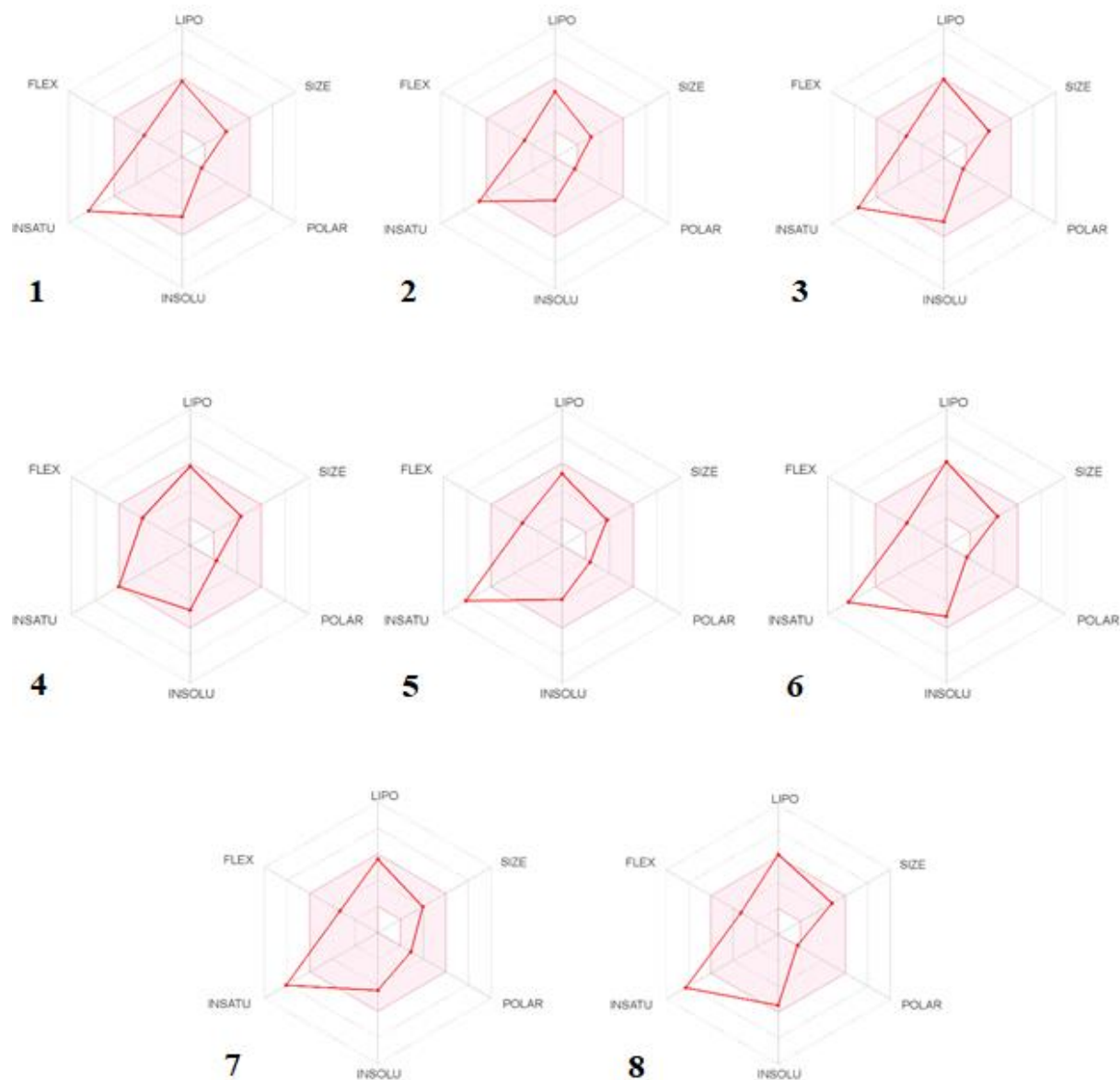


Figure 3. Drug-likeness of the chalcones (**1-8**) were predicted using Bioavailability radar. The pink area represents the optimal range for each properties (Lipo: Lipophilicity, Size: Molecular weight, POLAR: Total Polar Surface Area, INSOLU: Insolubility, INSATU: Insaturation, FLEX: Flexibility).

Table 3. SMILES, Lipinski rule of five and drug-likeness of the chalcones (**1-8**) predicted using molsoft programme.

No	SMILES	Molecular properties	Drug likeliness
1	<chem>O=C(\C=C\C1=CC=CC=C1)C1=CC=CC1[Fe]C1C=CC=C1</chem>	Molecular formula: C ₁₉ H ₁₆ Fe O Molecular weight: 316.06 Number of HBA: 1 Number of HBD: 0 MolLogP: 4.77 MolLogS: -4.96 (in Log(moles/L)) 3.50 (in mg/L) MolPSA: 14.06 Å ² MolVol: 341.99 Å ³ Number of stereo centers: 1 BBB Score: 4.81	<p>Drug-likeness model score: -0.97</p>

Table 3 (cont). SMILES, Lipinski rule of five and drug-likeness of the chalcones (1-8) predicted using molsoft programme.

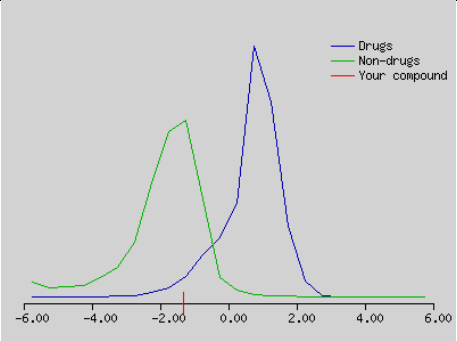
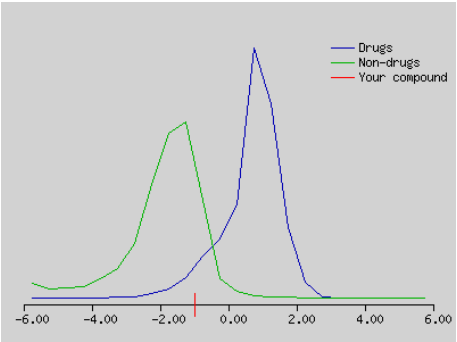
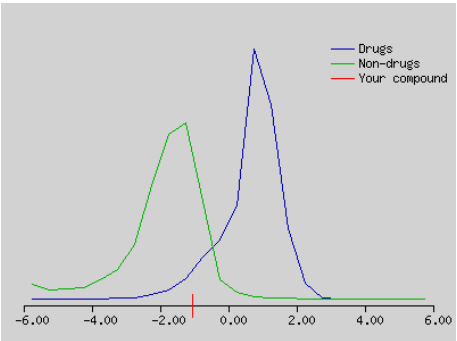
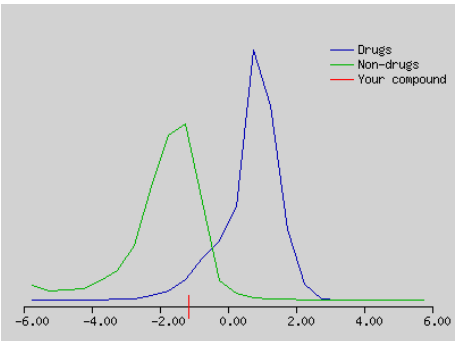
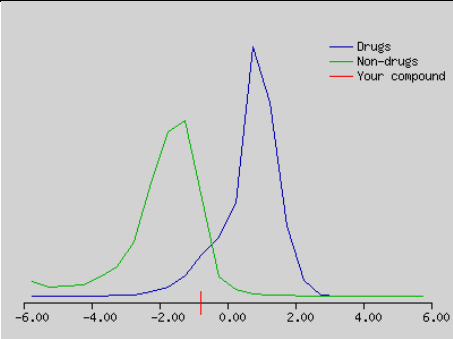
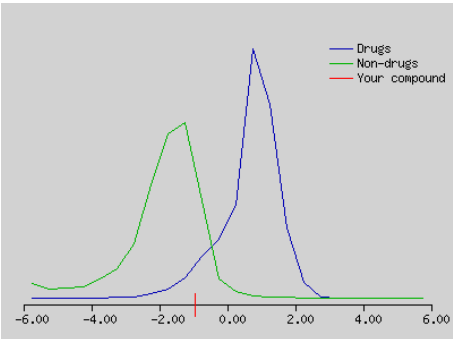
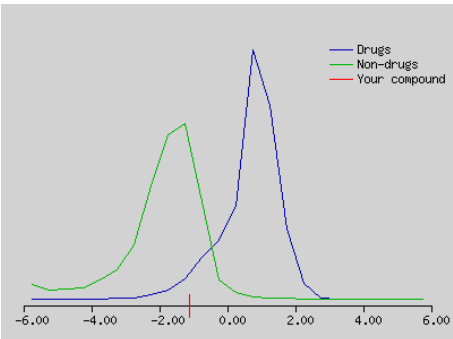
No	SMILES	Molecular properties	Drug likeliness
2	<chem>C\C=C\C(=O)C1=C C=CC1[Fe]C1C=CC =C1</chem>	Molecular formula: C ₁₄ H ₁₄ Fe O Molecular weight: 254.04 Number of HBA: 1 Number of HBD: 0 MolLogP: 3.53 MolLogS: -3.57 (in Log(moles/L)) 69.11 (in mg/L) MolPSA: 14.33 Å ² MolVol: 284.80 Å ³ Number of stereo centers: 1 BBB Score: 4.37	 Drug-likeness model score: -1.33
3	<chem>CC1=CC=C(\C=C\C (=O)C2=CC=CC2[F e]C2C=CC=C2)C=C 1</chem>	Molecular formula: C ₂₀ H ₁₈ Fe O Molecular weight: 330.07 Number of HBA: 1 Number of HBD: 0 MolLogP: 5.22 (> 5) MolLogS: -5.24 (in Log(moles/L)) 1.90 (in mg/L) MolPSA: 14.06 Å ² MolVol: 362.93 Å ³ Number of stereo centers: 1 BBB Score: 4.78	 Drug-likeness model score: -0.98
4	<chem>COC1=CC=C(\C=C\ C(=O)C2=CC=CC2[F e]C2CCC=C2)C=C 1</chem>	Molecular formula: C ₂₀ H ₁₈ Fe O ₂ Molecular weight: 346.07 Number of HBA: 2 Number of HBD: 0 MolLogP: 4.73 MolLogS: -4.70 (in Log(moles/L)) 6.86 (in mg/L) MolPSA: 21.60 Å ² MolVol: 373.84 Å ³ Number of stereo centers: 1 BBB Score: 4.92	 Drug-likeness model score: -1.05
5	<chem>O=C(\C=C\C1=CC= CO1)C1=CC=CC1[F e]C1C=CC=C1</chem>	Molecular formula: C ₁₇ H ₁₄ Fe O ₂ Molecular weight: 306.03 Number of HBA: 2 Number of HBD: 0 MolLogP: 3.94 MolLogS: -4.29 (in Log(moles/L)) 15.78 (in mg/L) MolPSA: 21.81 Å ² MolVol: 327.96 Å ³ Number of stereo centers: 1 BBB Score: 4.98	 Drug-likeness model score: -1.14

Table 3 (cont). SMILES, Lipinski rule of five and drug-likeness of the chalcones (**1-8**) predicted using molsoft programme.

No	SMILES	Molecular properties	Drug likeliness
6	<chem>C1C=CC=C(\C=C\C(=O)C2=CC=CC2[Fe]C2C=CC=C2)C=C1</chem>	Molecular formula: C ₁₉ H ₁₅ Cl Fe O Molecular weight: 350.02 Number of HBA: 1 Number of HBD: 0 MolLogP: 5.37 (> 5) MolLogS: -6.36 (in Log(moles/L)) 0.15 (in mg/L) MolPSA: 14.06 Å ² MolVol: 359.18 Å ³ Number of stereo centers: 1 BBB Score: 4.75	 <p>Drug-likeness model score: -0.79</p>
7	<chem>O=C(\C=C\C1=CC=CS1)C1=CC=CC1[Fe]C1C=CC=C1</chem>	Molecular formula: C ₁₇ H ₁₄ Fe O S Molecular weight: 322.01 Number of HBA: 2 Number of HBD: 0 MolLogP: 4.15 MolLogS: -4.64 (in Log(moles/L)) 7.42 (in mg/L) MolPSA: 15.08 Å ² MolVol: 340.20 Å ³ Number of stereo centers: 1 BBB Score: 4.79	 <p>Drug-likeness model score: -0.94</p>
8	<chem>BrC1=CC=C(\C=C\C(=O)C2=CC=CC2[Fe]C2C=CC=C2)C=C1</chem>	Molecular formula: C ₁₉ H ₁₅ Br Fe O Molecular weight: 393.97 Number of HBA: 1 Number of HBD: 0 MolLogP: 5.61 (> 5) MolLogS: -5.84 (in Log(moles/L)) 0.57 (in mg/L) MolPSA: 14.06 Å ² MolVol: 363.85 Å ³ Number of stereo centers: 1 BBB Score: 4.70	 <p>Drug-likeness model score: -1.13</p>

4. Conclusions

1-8 chalcones were obtained via Claisen–Schmidt condensation and the Friedel–Crafts acylation. Their structures were confirmed by means of ¹H and ¹³C NMR and FT-IR spectroscopy. Anti-cancer activity studies of them proved that they have excellent anti-cancer activities against both PC3 and HeLa cells. Notably, **1, 3, 4, 5, 6, 7** and **8** showed better activities more than 5 times than the standard drug (5-FU) even at the lowest concentration (5 μM) against PC3 cell. Moreover, the chalcones (**1-8**) obey Lipinski's rule. Also, they have satisfactory physicochemical properties such as lipophilicity, solubility, pharmacokinetics and bioavailability radar. Thus, it can be deduced from the aforementioned results ferrocenyl chalcones (**1-8**) are promising candidates for design of new drugs.

References

- Baba, K., Nakata, K., Taniguchi, M., Kido, T., & Kozawa, M. (1990). Chalcones from *Angelica keiskei*. *Phytochemistry*, 29, 3907-3910. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(90\)85357-L](https://doi.org/10.1016/0031-9422(90)85357-L)
- Boumendjel, A., Ronot, X., & Boutonnat, J. (2009). Chalcones Derivatives Acting as Cell Cycle Blockers: Potential Anti Cancer Drugs?. *Current Drug Targets*, 10, 363-371. <https://doi.org/10.2174/138945009787846416>
- Dogan, Ö., Şenol, V., Zeytinci, H., Koyuncu, H., & Bulut, A. (2005). Efficient synthesis of ferrocenylenones by Friedel-Crafts acylation with EtAlCl₂-Me₃Al. *Journal of Organometallic Chemistry*, 690, 430-434. <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2004.09.055>

- Hano, Y., Ichikawa, K., Okuyama, M., Yamanaka, J., Miyoshi, T., & Nomura, T. (1995). Sanggenons R, S, and T, three new isoprenylated phenols from the Chinese crude drug Sang-Bai-Pi (*Morus* root bark). *Heterocycles*, 2, 953–965. <http://doi.org/10.3987/COM-94-S96>
- Harborne, J. B., Mabry, T. J., & Mabry, H. (1975). *The flavonoids*. Chapman and Hall, London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2909-9>
- Janka, V., Zatkan, D., Ladislav, V., Pal, P., & Gabriela, M. (2015). Some ferrocenyl chalcones as useful candidates for cancer treatment. *In Vitro Cellular & Development Biology-Animal*, 51, 964–974. <http://doi.org/10.1007/s11626-015-9919-6>
- Kakati, D., & Sarma, J. C. (2011). Microwave-assisted solvent free synthesis of 1, 3-diphenyl propenones. *Chemistry Central Journal*, 5(1), 8. <https://doi.org/10.1186/1752-153X-5-8>
- Li, Y., Ishibashi, M., Chen, X., & Ohizumu, Y. (2003). Littorachalcone, a new enhancer of NGF-mediated neurite outgrowth, from *Verbena littoralis*. *Chemical & Pharmaceutical Bulletin*, 51, 872–874. <https://doi.org/10.1248/cpb.51.872>
- Lopez, J.A., Barillas, W., Gomez-Laurito, J., Martin, G.E., Lin, F.T., Al-Rehaily, A.J., Zemaitis, M.A., & Schiff, P.L. (1998). Galiposin: a new β -hydroxy chalcone from *Galipea granulosa*. *Planta Medica*, 64, 76–77. <http://doi.org/10.1055/s-2006-957373>
- Masesane, I.B., Yeboah, S.O., Liebscher, J., Mügge, C., & Abegaz, B.M. (2000). A bichalcone from the twigs of *Rhus pyroides*. *Phytochemistry*, 53, 1005–1008. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(99\)00553-1](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(99)00553-1)
- Muskinja, J., Burmudzija, A., Ratkovic, Z., Rankovic, B., Kosanic, M., Bogdanovic, G.A., & Novakovic, S.B. (2016). Ferrocenyl chalcones with O-alkylated vanillins: synthesis, spectral characterization, microbiological evaluation, and single-crystal X-ray analysis. *Medicinal Chemistry Research*, 25, 1744–1753. <https://doi.org/10.1007/s00044-016-1609-8>
- Parkin, D.M., Bray, F., Felay, J., & Pisani, B. (2005). Global Cancer Statistics 2002, CA. *Cancer Journal for Clinicians*, 55, 74–108. <https://doi.org/10.3322/canjclin.55.2.74>
- Petignat, P., & Roy, M. (2007). Diagnosis and management of cervical cancer. *BMJ*, 335, 765–768. <http://doi:10.1136/bmj.39337.615197.80>
- Prakash, O., Kumar, A., Sadana, A., Prakash, R., Singh, S.P., Claramunt, R.M., Sanz, D., Alkorta, I., & Elguero, J. (2005). Study of the reaction of chalcone analogs of dehydroacetic acid and o-aminothiophenol: synthesis and structure of 1,5-benzothiazepines and 1,4-benzothiazines. *Tetrahedron*, 61, 6642–6651. <https://doi.org/10.1016/j.tet.2005.03.035>
- Shotter, R. G., Johnston, K. M., & Jones, J. F. (1978). Reactions of unsaturated acid halides IV1: Competitive Friedel-Crafts acylation and alkylations of monohalogenobenzenes by the bifunctional cinnamoyl chloride. *Tetrahedron*, 34, 741–746. [https://doi.org/10.1016/0040-4020\(78\)88113-7](https://doi.org/10.1016/0040-4020(78)88113-7)
- Smith, H. E., & Paulson, M. C. (1954). The preparation of chalcones from hydroxy and methoxy aldehydes and ketones. *Journal of American Chemical Society*, 76, 4486–4487. <https://doi.org/10.1021/ja01646a072>
- Tanaka, T., Inuma, M., Yuki, K., Fujii, Y., & Mizuno, M. (1991). Two New β -Hydroxychalcones from the Root Bark of *Pongamia pinnata*. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 39, 1473–1475. <https://doi.org/10.1248/cpb.39.1473>
- Tomasch, M., Schwed, J. S., & Stark, H. (2012). Novel chalcone based fluorescent human histamine h(3) receptor ligands as pharmacological tools. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 6, 14. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2012.00014>
- Yadav, D.K., Kaushik, P., Pankaj, Rana V.S., Kamil, D., Khatri, D., & Shakil, N.A. (2019). Microwave Assisted Synthesis, Characterization and Biological Activities of Ferrocenyl Chalcones and Their QSAR Analysis. *Frontiers in Chemistry*, 7, 814. <http://doi:10.3389/fchem.2019.00814>
- Zhuang, C., Zhang, W., Sheng, C., Zhang, W., Xing, C., & Miao, Z. (2017). Chalcone: A Privileged Structure in Medicinal Chemistry. *Chemical Reviews*, 117, 7762–7810. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00020>
- Zou, G., Guo, J. P., Wang, Z. Y., Huang, W., & Tang, J. (2007). Heck type coupling vs. conjugate addition in phosphine-rhodium catalyzed reactions of aryl boronic acids with α,β -unsaturated carbonyl compounds: a systematic investigation. *Dalton Transactions*, 28, 3055–3064. <https://doi.org/10.1039/B615473E>



An Investigation of Production and Properties of RHA Reinforced Hybrid Composites by Vacuum Infiltration Method

Naci Arda Tanış¹, Onur Okur¹, Erkan Yılmaz², Mustafa Türkmen³, Azmah Hanim Binti Mohamed Ariff⁴, Temitope T. Dele-Afolabi⁴, Recep Çalın¹

¹Dept. of Metallurgical and Materials Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Kırıkkale University, Kırıkkale, 71450, TURKEY

²Sima Aluminium, Kocaeli, 41420, TURKEY

³Transportation Technologies Institute, Gebze Technical University, Kocaeli, 41380, TURKEY

⁴Advance Engineering Materials and Composites Research Center, (AEMC), Faculty of Engineering, Universiti Putra Malaysia, 43400 UPM Serdang, Selangor, MALAYSIA

Başvuru/Received: 29/03/2021

Kabul / Accepted: 08/06/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 18/06/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Abstract

The harmful effect of agricultural waste has been intensified over the last decade and impacts the environment every passing day. Rice husk waste is a major problem in Turkey and the far east countries. Due to the economic dependence of the mass cultivation and the production of rice, the disposal of the waste appears both time and money consuming. Alternative methods sought over the years and the implementation of the rice husk in the production of composites is seen as a promising method. RHA is a burning residue of rice husk and the implementation of RHA in the production of aluminum composites gained attention in recent years. In this study, aluminum composites having 5 wt.% Al_2O_3 reinforcement and 5 wt.% $Al_2O_3/0.5$, 1.0, and 1.5 wt.% RHA reinforcement were produced by vacuum infiltration process which is a cheap and cost-effective route. AA7075 alloy without any reinforcement was produced for comparison. Solution heat treatment at 480 °C for 2 hours was applied and then quenched following by aging heat treatment at 120 °C for 8 hours. The microstructure, microhardness, and wear tests of all composites were investigated. Increasing RHA content up to 1 wt.% and aging heat treatment increased the hardness of composites. Wear coefficient decreased by increasing RHA content.

Key Words

"RHA, Al_2O_3 , Vacuum infiltration, AA 7075, Aging heat treatment, Wear test"

1. Introduction

The wide application of metal matrix composites (MMCs) in automotive, aviation, transport, and defense industries has provided many benefits in terms of their high mechanical strength, high wear resistance, good thermal stability, good corrosion resistance, and relatively low density (Zhang et al. 2013). Metal matrix composites generally consist of two or more constituents which favorably combine the overall characteristics of each constituent. As being one of the constituents, metal matrix is generally chosen among aluminum, titanium, magnesium, iron, and their alloys (Kaushik and Rao, 2016). While each matrix material ensures unique properties, aluminum and its alloys are by far the most preferred matrix materials since it is a good solution in weight reduction of vehicles along with providing attractive mechanical properties. As for the other constituents of metal matrix composites, many oxides and carbides such as SiC, B₄C, Al₂O₃, MgO, and TiC are used as reinforcement which bring interesting properties into metal matrix composites. Al₂O₃ reinforced aluminum composites find a wide range of applications in automotive industry such as brake discs, piston, cylinder shells, and steering shaft where high wear resistance is a critical requirement (Prasad and Ashtana, 2004). However, the high production cost of metal matrix composites should be taken into account in comparison with the conventional materials used in automotive industry.

Recently, more researchers have focused on aluminum matrix composites reinforced with agricultural waste due to the high cost of ceramic reinforcements (Prakash et al. 2017). The most used agricultural and industrial waste materials are volatile coal ash (FA), red mud, rice husk ash (RHA), bamboo fiber ash, and sugar cane ash (Shaikh et al. 2019). Among the many agricultural waste used as reinforcements, RHA is one of the most widely employed in the production of metal matrix composites. Every year, thousands of tons of rice waste generated due to the large-scale production of rice. Current rice production in the world is estimated to be over 700 million tons and rice husk constitutes around 20 % of the weight of rice. RHA is the product of incineration of rice husk and the characteristics of the ash are mainly dependent on three parameters: (1) chemical composition of the rice husks, (2) burning time, and (3) burning temperature. Every 100 kg of husks burnt in a boiler yields around 25 kg of RHA. When considering the vast amount of rice husk waste and RHA as its incineration product, it seems plausible to use of RHA in the production of aluminum matrix composites due to the fact that it is attainable and cost-efficient (Prasad and Krishna, 2012).

The boost of advancement in technology is unprecedented and outpaces the modern-day technology provided by suppliers. This pushes the limits of engineering and science and brings about the birth of a new class of composites named as hybrid composites. Hybrid composites consist of two or more reinforcements and each reinforcement gives the distinctive characteristic to composite. Even the most demanding properties can be accomplished by choosing the optimum combination between reinforcement materials. Therefore, as for the right combination, not only type and number of reinforcements but also volume fraction and morphology of reinforcements are prerequisites in achieving the best combination. Along with materials selection, the selection of the production method is a vital step for low-cost production. Many methods such as casting, powder metallurgy, in-situ processes, and infiltration are used to produce aluminum matrix composites. The infiltration method stands out as one of the most effective method among other production methods, the method includes non-pressure, pressure, and vacuum infiltration methods (Çalın and Çıtak, 2007). The infiltration technique is a relatively simple and a cost-efficient process that involves filling the pores between the preformed reinforcements as molten metal proceeds through the mold. Therefore, molten metal fills the pores of the preform and allow matrix to constitute composite (Surappa, 2003). In vacuum infiltration technique, a vacuum pipe which is connected to vacuum pump is attached to mold which is made of a glass or a stainless-steel tube. When mold dips into molten metal, a low pressure via vacuum line which is attached to the top of the mold is obtained by turning on the vacuum pump and, thus, this pressure enables the proceeding of metal into the mold (Duran et al. 2018).

Researches on the synthetic reinforcements such as SiC, B₄C, Al₂O₃, MgO, and TiC have been intensively carried out for many decades Likewise, there are plenty number of studies dedicated to hybrid synthetic reinforced composites. However, studies focused on the hybrid composites consist of synthetic and agro-waste reinforced composites are few. Overview of some of the recent studies focused on synthetic and agro-waste hybrid reinforced composites presented below. Alanem et al. produced RHA and Al₂O₃ reinforced hybrid aluminum composites by two-step stir casting method. It was observed that there was a slight decrease in hardness and tensile strength of the hybrid as compared to the monolithic reinforced Al₂O₃ composites. Promising results were obtained with the composites containing 2 wt.% RHA which exhibited better strength, elongation and fracture toughness as compared to the monolithic and hybrid reinforced composites. Prasad et al. used double stir casting method to produce RHA and SiC hybrid reinforced composites and they reported that while elongation decreases with the increase in reinforcement, tensile strength and yield strength increase with an increase in the percent weight fraction of the reinforcement particles. They concluded that hybrid reinforced aluminum composites with up to 8 wt.% rice hush ash and SiC particles could be produced by using double stir casting method.

As can be inferred from the overview, the studies carried out by implementing different production methods are scarce. Therefore, this study focused on the production of synthetic and agro-waste hybrid reinforced aluminum composites by vacuum infiltration method and the hardness and wear properties of the composites were investigated.

2. Materials and Methods

In this study, AA7075 alloy was chosen as matrix. Al₂O₃ and RHA were chosen as reinforcement materials. The chemical composition of the aluminum alloy and RHA was determined and presented in Table 1 and Table 2, respectively.

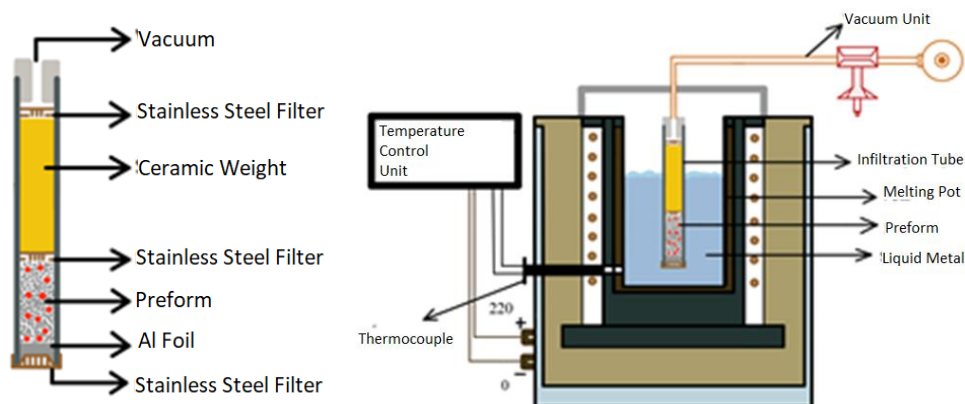
Table 1. Elemental composition of AA7075

Element	wt.%
Al	89.9
Zn	5
Mg	2.6
Cu	1.6
Cr	2.6

Table 2. Elemental composition of the RHA

Element	wt.%
C	6.78
O	56.40
Si	35.74
Mg	0.43
Ca	0.66

The preforms consisting of 5:0, 5:0.5, 5:1.0, and 5:1.5 wt.% Al_2O_3 and RHA, respectively, were mixed to produce aluminum 7075 matrix composite materials. The schematic representation of the steel tube used in the vacuum infiltration method is given in Figure 1. The inner diameter of the steel tube is 10 mm, the wall thickness is 1 mm and the length of the tube is 300 mm. After the stainless-steel filter was placed at the bottom part of the tube, the preform was placed into the tube. Another stainless-steel filter was placed on top of the preform, silica sand grains are placed on top of that filter to prevent the molten metal from proceeding the vacuum line. Lastly, stainless-steel filter was placed to the top of the tube to keep silica grains from getting through the vacuum line. The vacuum pump was started up and infiltration tube was dipped into molten metal. The infiltration tube was pulled out of the molten metal after 3 minutes, and was left to cool down to room temperature. Finally, the tubes were machined to remove the steel tube mold and get the composite materials.

**Figure 1.** Schematic figures of **a)** infiltration tube and **b)** vacuum infiltration setup.

Some of the composites produced by vacuum infiltration method was left as-cast and others were further taken into the furnace for solid solution heat treatment and the heat treatment temperature was 480 °C and duration was 2 hours. After 2 hours, the composites were quenched and taken to another furnace for T6 aging heat treatment. Aging heat treatment was applied at 120 °C for 8 hours. The schematic figure of T6 heat treatment is given in Figure 2. After aging heat treatment, microstructure analysis, microhardness values, and wear tests on the pin-on-disc device were performed and microstructure images were taken by using scanning electron microscope.

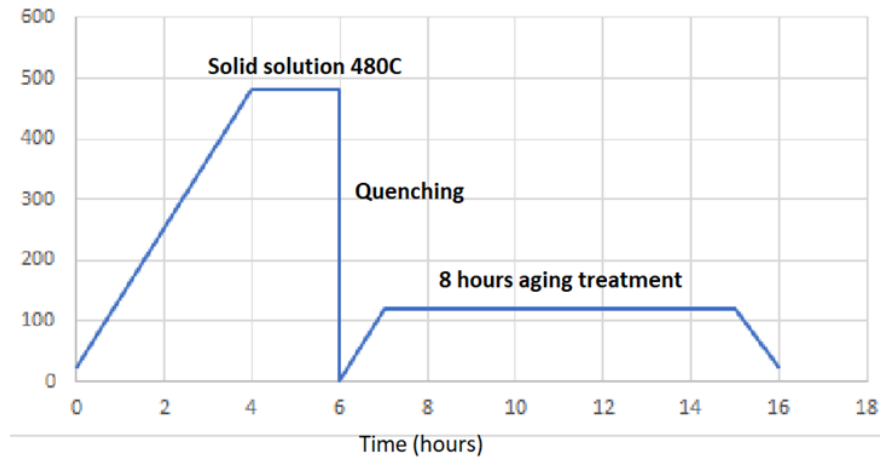


Figure 2. Schematic image of the heat treatment applied to the samples

3. Result and Discussion

Figure 3.a shows the microstructure image of the RHA reinforcement particles. As can be seen from the figure, RHA particles have a long and porous structure. In Figure 3.b, the microstructure image of the sample containing 1 wt.% RHA. As can be understood from the microstructural images, the particle fell off the surface during the sanding and polishing processes, but its replica remained on the surface. In this way, it has made it possible to examine the distribution of particles on the surface.

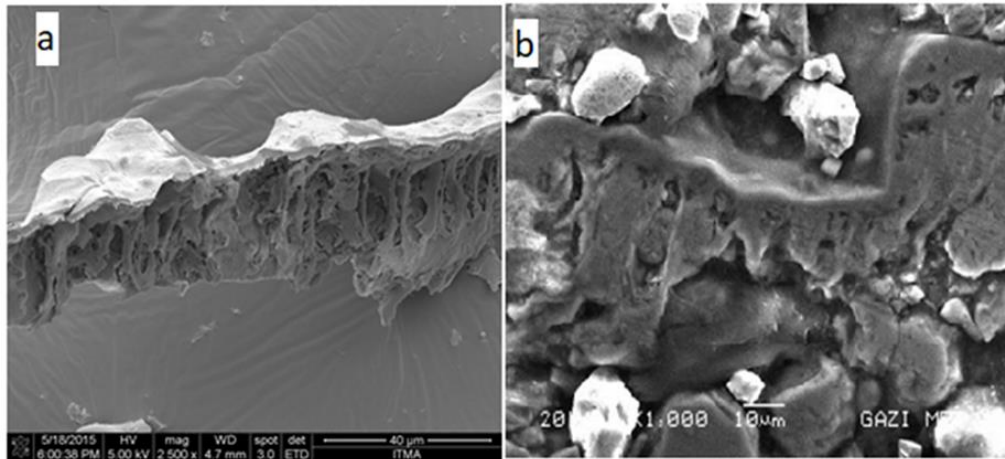


Figure 3. SEM image of a) RHA particle and b) replica of RHA on matrix

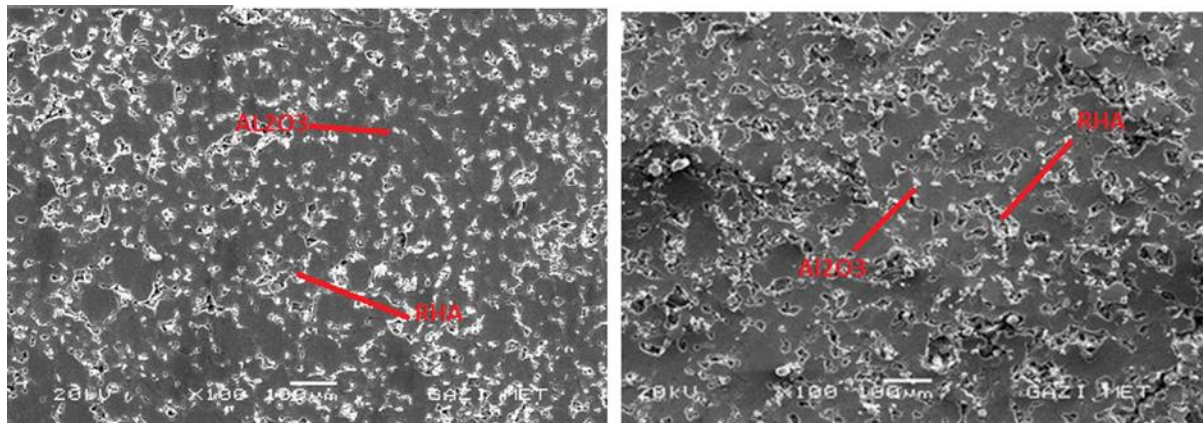


Figure 4.a) SEM image of the sample containing 0.5% RHA and b) SEM image of the sample containing 1% RHA

SEM images of aged for 8 hours 5 wt.% Al_2O_3 /0.5 wt.% RHA/AA7075 matrix composite and 5 wt.% Al_2O_3 /1 wt.% RHA/AA7075 are shown in Figures 4.a and b, respectively. It can be seen that Al_2O_3 reinforcement were homogeneously distributed in the samples. It is

noteworthy to indicate that long and narrow pores increased as RHA content increases shown in Figure 4.a and 4.b. This is due to the poor wettability of RHA particles by melting metal. Additionally, the analyze carried out by SEM revealed that there are white/gray regions around the pores formed by the pulled-off RHA particles. EDS analysis taken from these regions showed that mainly Si and C elements diffused into the matrix.

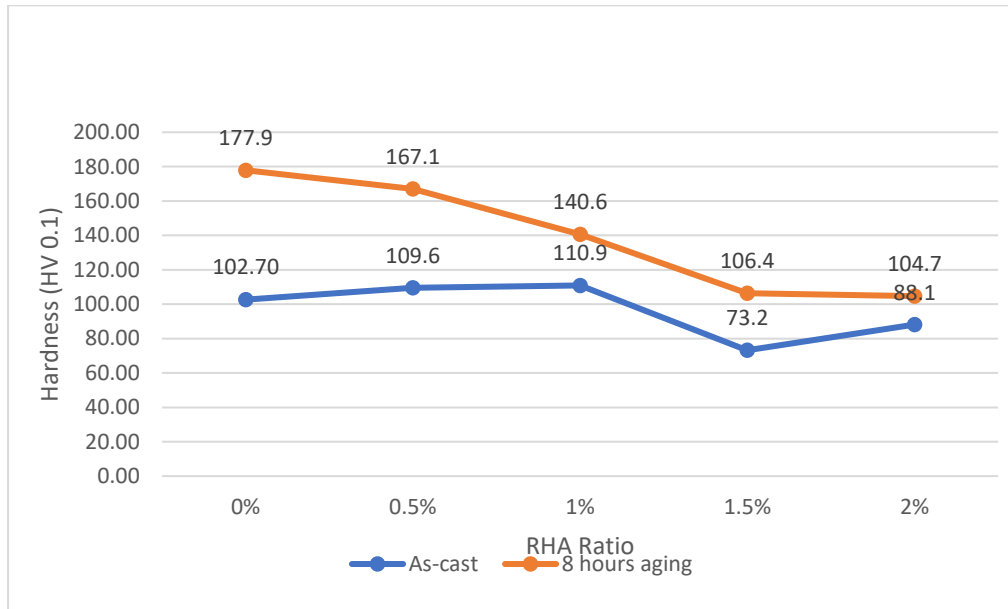


Figure.5 Hardness of samples that were non-heat treated and heat-treated for 8 hours

Microhardness tests were carried out with non-heat treated samples and T6 heat treated for 8 hours at a loading of 200 g, as shown in Figure 5, it is observed that the hardness of all samples increased as a result of the 8 hours aging process. While the highest hardness increase was observed in the sample with 0 wt.% RHA/5 wt.% Al₂O₃ reinforced aluminum matrix which increased 102.7 HV in as-cast sample to 177.9 HV in 8 hours aging heat treated sample. It is determined that the hardness difference between the non-heat-treated and heat-treated samples decreased as the RHA reinforcement ratio increased. Among the non-heat treated samples, the highest hardness value was determined as 110.9 HV in the composite containing 5 wt.% Al₂O₃/1 wt.% RHA, and the lowest hardness value was 73.2 for the sample containing 5 wt.% Al₂O₃/1.5 wt.% RHA reinforcement. It is thought that the reason of the decrease in hardness might be the aggregation of the reinforcement that were non-homogeneously distributed and caused the pores. SEM images confirm this interpretation. The highest hardness after heat treatment is observed in the sample without RHA reinforcement and the hardness decreased with the increasing weight percentage of RHA reinforcement. Çalın (2019) obtained similar results in his study on aluminum matrix RHA reinforced hybrid composites in 2019.

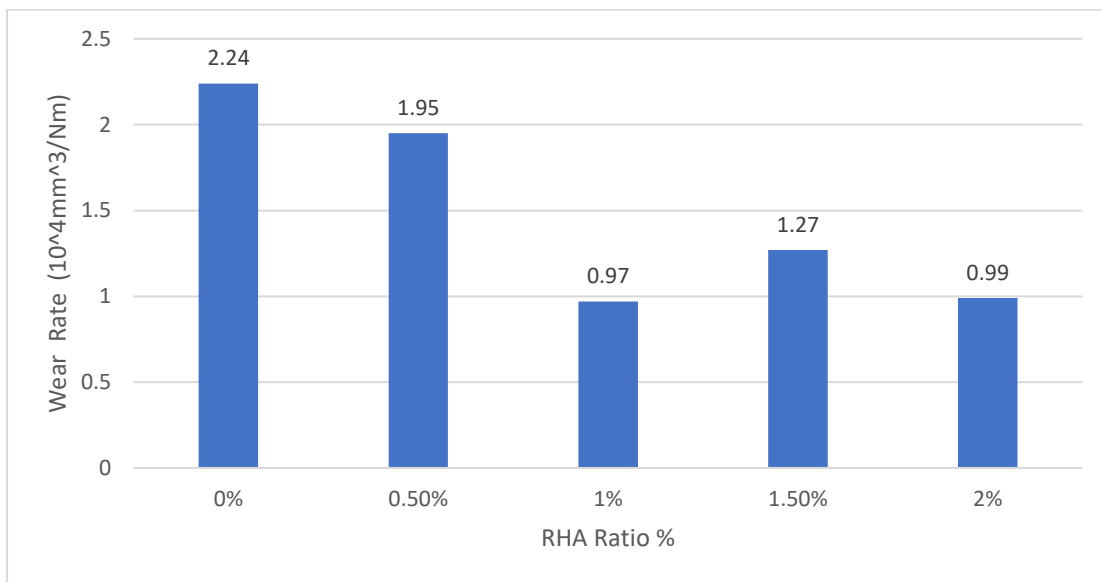


Figure 6. Wear rate of composites with 5 wt.% Al₂O₃ and 0.5, 1, 1.5, 2 wt.% RHA aged for 8 hours and AA7075 matrix composites.

Wear rates of samples were calculated by weight loss and aged for 8 hours are given in Figure 6. When the rates were taken into consideration, the lowest wear rate was detected in the sample containing 5 wt.% Al₂O₃/1 wt.% RHA, while the sample without RHA reinforcement had the highest rate of wear. Considering the hardness of composites in Figure 5, it is expected that the wear rate will be less because the hardness is the highest in the samples without RHA, but the hardness values were taken directly from the matrix, not from the grain. During the pin-on disc test, wear also occurred on the surface of RHA particles and it was seen from Figure 6 that the RHA particles reduced the wear rate. While the wear rate decreased in proportion to increase in RHA content up to 1 wt.%, the wear rate increased slightly in the composite containing 1.5% wt. RHA. Özyürek et al. (2016) found similar results which higher wear rates in their pin-on disc test on non-aged specimens at the same reinforcement rates. It was observed that the wear rate decreased with 8 hours aging process.

4. Conclusions

- Al₂O₃ ceramic reinforcement is homogeneously distributed throughout the samples while some agglomeration detected in the composites having higher RHA content.
- Regarding the hardness of Al₂O₃ and RHA reinforced hybrid composites with AA7075 matrix, while the highest hardness was observed in the non-heat treated sample containing 1% RHA. As RHA content increases, the hardness decreased in all aging heat treated samples.
- As can be understood from the pin-on disc tests, it was determined that the 8-hour aging heat treatment reduced the wear rate and the lowest wear rate was attained in the sample containing 1% RHA reinforcement.

Acknowledgements

This study was supported by the Research Management Center, Universiti Putra Malaysia (UPM- Grant Putra; UPM/700-2/1/GPBI/2017/9553600) and the Department of Metallurgy and Materials Engineering, Kirikkale University, Turkey (project number of BAP2017/81 and 2016/44).

References

- Bhansali K.J., Mehrabian R. (1982). Abrasive Wear of Aluminum-Matrix Composites, *J. Met.*, 3~ 1. 30-34.
- Calin R., Citak R. (2007). Effect of powder size on infiltration height in producing MgO reinforced Al matrix composite by vacuum infiltration method; in *Materials science forum*, vol. 534: Trans Tech Publ, pp. 797-800.
- Duran O., Okur O., Tanis N.A., Calin R., Azmah Hanim M.A., Dele-Afolabi T.T. (2018). Investigation on the Properties of Agro-Waste Reinforced Aluminum Matrix Composites. Presented in Symposium and Workshop on Materials and Characterization, 24-25th July 2018.
- Kaushik NC, Rao R.N. (2016). Effect of grit size on two body abrasive wear of Al 6082 hybrid composites produced by stir casting method, *Tribology International*, Volume 102, Pages 52-60, ISSN 0301-679X,
- Prakash Kumarasamy S., Vijayananth K., Thankachan T., Pudhupalayam M.G. (2017). Investigations on mechanical and machinability behavior of aluminum/flyash cenosphere/Gr hybrid composites processed through compocasting, *J. Appl. Res. Technol.* 15 430–441.
- Prasad D.S., Krishna A.R. (2012). Tribological Properties of A356.2/RHA Composites, *Journal of Materials Science & Technology*, Volume 28, Issue 4, Pages 367-372, ISSN 1005-0302.
- Prasad S.V., Asthana R. (2004). Aluminium metal-matrix composites for automotive applications: tribology considerations *Tribol Lett*, 17 (3), pp. 445-453
- Shaikh M.B.N., Sajjad A., Tariq A., Waseem A., Shaikh M.A.N., Ali M. (2019). Microstructural, mechanical and tribological behaviour of powder metallurgy processed SiC and RHA reinforced Al-based composites, *Surfaces and Interfaces*, Volume 15, Pages 166-179, ISSN 2468-0230,
- Surappa M.K. (2003). Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities; *Sadhana*, journal article vol. 28, no. 1, pp. 319-334.
- Tanış N.A., Okur O., Duran O., Dele-Afolabi T.T., Azmah Hanim M.A., Calin R. (2019) An Investigation on the Properties of RHA and Al₂O₃ Reinforced Hybrid Composites Case Study On Material Engineering And Applied Sciences: ISBN 978-983-2408-68-0 p. 57-67, UPM Malaysia.

Yildirim, M., Özyürek, D., Gürü, M. (2016). The Effects of Precipitate Size on the Hardness and Wear Behaviors of Aged 7075 Aluminum Alloys Produced by Powder Metallurgy Route. Arab J Sci Eng 41, 4273–4281 <https://doi.org/10.1007/s13369-016-2078-6>

Zhang J, Jung-Moo L, Young-Hee C, Su-Hyeon K, Yu H. (2013) Fabrication of aluminum matrix composites by quick spontaneous infiltration process through combustion reaction of Al–Ti–B₄C–CuO powder mixtures in molten aluminum, Scripta Materialia, Volume 69, Issue 1, Pages 45-48, ISSN 1359-6462,



Türkiye’de 50MW Üstü GES Üretimi Gerçekleştiren Şehirlerimizde Agrivoltaic Sistem Kullanılabilirliğinin İncelenmesi

Investigation Of Agrivoltaic System Usability Generating Over 50MW Of SPP Different Cities in Turkey

Atıl Emre Cosgun 

¹Aksaray Ortaköy M.Y.O., 68100, Aksaray, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 07/03/2021

Kabul / Accepted: 10/06/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 18/06/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi ile enerji ihtiyacımızın karşılanabilmesi için geniş alanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Güneş enerji santralleri için geniş arazilerin kullanılması sınırlı arazi kaynakları için olumsuz bir durum olsa da panel atlarında yapılacak tarım fikri bu durumu avantaja dönüştürebilmektedir. Aynı toprak parçası üzerinde bir yandan fotovoltaiik paneller ile elektrik üretilirken diğer taraftan panellerin alt kısımlarında tarım yapılması “Agrivoltaic sistemler” olarak adlandırılmaktadır. Agrivoltaic sistemlerin hem tarım üretimine hemde elektrik üretimine olumlu katkıları vardır. Bununla birlikte panellerin alt kısmında oluşan gölgelik alanda, toprak daha uzun süre nemli kalmaktadır. Toprağın nemli olmasından dolayı bitki için harcanan su miktarlarında, geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında daha az olmaktadır. Böylelikle, Agrivoltaic sistemler kullanılarak su tasarrufu yapılabilmektedir. Bu çalışmada, Agrivoltaic sistemler tanıtılarak, ülkemizdeki Konya, Kayseri, Ankara, Afyonkarahisah, Denizli ve Antalya şehirlerimizin potansiyel ışınım değerleri ve güneş yörünge hareket grafikleri kullanılarak ülkemizdeki Agrivoltaic sistemlerin genel bir değerlendirmesi yapılmıştır. Bu şehirlerin seçilmesinin sebebi 50MW üstü kurulu GES’lerin bulunmasıdır. Ayrıca yapılan çalışmada Agrivoltaic sistemin, Türkiye’nin tüm bölgelerinde kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Agrivoltaic, fotovoltaiik, güneş enerjisi, tarım”

Abstract

Large areas are needed to meet our energy needs with solar energy, which is one of the renewable energy sources. Although the use of large lands for solar power plants is a negative situation for limited land resources, the idea of agriculture under the panels can turn this situation into an advantage. While electricity is generated by photovoltaic panels on the same land, on the other hand, farming in the under of the panels is called “Agrivoltaic systems”. Agrivoltaic systems have positive contributions to both agricultural production and electricity generation. Besides, the soil stays moist for a longer time in the shade area formed at the bottom of the panels. Due to the moist soil, the amount of water spent for the plant is less compared to traditional methods. Thus, water savings can be achieved by using Agrivoltaic systems. In this study, by introducing Agrivoltaic systems, a general evaluation has been made by using solar trajectory motion graphics and potential radiation values of our country’s cities such as; Konya, Kayseri, Ankara, Afyonkarahisah, Denizli, and Antalya The reason for choosing these cities is that there are GES over 50MW installed. In addition, this system performed in this study, the availability in all regions of Turkey were evaluated.

Key Words

“Agrivoltaic, photovoltaic, solar energy, agriculture”

1. Giriş

Dünya ile Güneş arasındaki ortalama mesafe 1.495×10^{11} m'dir. Dünya'nın eksantrik yörüngeye sahip olmasından dolayı, aradaki mesafe % 1,7 oranında değişebilmektedir. Arada bu kadar mesafe olmasına rağmen Güneş, yeryüzünün en büyük ve en önemli enerji kaynağıdır. Atmosfer ve bulutlar, güneş ışınımının bir kısmının dünyaya gelmesini engelledi, güneşten yeryüzünün herhangi bir yüzeyine gelen güneş ışınimleri; direkt, difüz ve yansıyan ışınımlardan oluşmaktadır. Yeryüzüne düşen güneş ışıkları ile yüzeyler arasında bir açı oluşur. Bu açıya bağlı olarak güneşin periyodik hareketleri tespit edilebilmektedir (Karafil vd., 2016). Güneş'in çapı göz önünde bulundurulursa, yeryüzünün herhangi bir yüzeyine düşen güneş ışınımının maksimum açısı yaklaşık 32° 'dir. Güneş ışınım miktarını etkileyen bileşenler sıralanacak olursa; dünya ve güneş arası mesafe, hava kirliliği, güneşin konumu, bulutlar ve su buharı sayılabilir (Aksungur et al., 2009). Ayrıca, güneş'ten dünya'ya gelen ışınımın mevsimlere göre farklılık göstermesi, fotovoltaik paneller ile elde edilen elektriğin verimliliğini de etkilemektedir. Bununla birlikte, panellerin verimliliğine etkileyen bir çok çevresel etkenler de bulunmaktadır bunlar; yağmur, kar, UV ışınimleri, tozlanma, panel içerisinde balon oluşumu veya sararmalar olarak sıralanabilir (Demir, 2020). Günümüzde teknolojinin gelişmiş olmasına rağmen fotovoltaik verimlilikleri %15 ile %22 arasında değişmektedir. Yeryüzünde, birim yüzeye düşen ışınım miktarları sayılan sebeplerden dolayı değişkenlik göstermesi ve teknolojinin onca gelişmiş olmasına rağmen panel verimliliklerinin düşüklüğü, Güneş Enerji Santrallerinin (GES) kurulması için gerekli olan büyük alanların sebeplerindedir. GES arazileri büyük alanlar kapladıkları için genellikle bu arazilerin tarım arazilerinin dışında, verimsiz topraklar üzerinde kurulmalarına müsaade edilmektedir. Ancak günümüz şartları düşünüldüğünde, yeryüzünde yaşayan milyarlarca insanın, beslenme ve enerjiye olan gereksinimi göz ardı edilemeyecek kadar fazladır. Fotovoltaik panel kurulu arazilerin tek başına elektrik üretim alanları olarak kullanılmasına alternatif olarak "Agrivoltaic Sistem" fikri tarihte ilk kez 1981 yılında Goetzberger ve Zastrow tarafından ortaya atılmıştır (Goetzberger and Zastrow, 1982). Toprağa dayalı tarım ve Güneş enerjisi ile elektrik üreten üreteçlerin (fotovoltaik-PV) birleşmesinden oluşan bir terim olan "Agrivoltaic", PV paneller altında gerçekleştirilen tarımdır. Bu fikir ortaya çıktığı ilk yıllarda dikkat çekememiş olsa da ilerleyen yıllarda oldukça önem kazanmıştır. Agrivoltaic sistemlerin neden önemli oldukları, aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Agrivoltaic sistemler ile aynı toprak parçası üzerinde elektrik üretimi yapılabildiği gibi tarımda yapılmaktadır. Mevcut, PV ile elektrik üretim yerlerinde sadece elektrik üretilmektedir. Bu durum PV altında, tarım yapılabilecek arazilerden maksimum alınabilecek verimin önüne geçmektedir.
- Agrivoltaic sistemlerin kullanımı ile elektrik üretim verimi artırılabilir. PV panellerin sıcaklıklarının artması, verimliliğinin düşmesine sebep olmaktadır. Panellerin alt kısımlarında yetiştirilen bitkilerin sulanması ile panel altlarında mikro-iklimik bir ortam oluşmakta ve panellerin sıcaklıkları bu yöntemle düşürülmektedir (Dupraz et al., 2011). Bu sayede panel soğutularak, verimliliği arttırılmaktadır.
- Agrivoltaic sistemler ile tarımsal arazilerde kullanılan su miktarları azami ölçüde azaltılmaktadır. Panelin alt kısmında, gölgede kalan toprak daha uzun süre nemli olarak kalacak ve bitkilerin büyüyüp gelişmesi için ihtiyaç duyulan su, nemli topraktan uzun süre karşılanabilecektir.
- Agrivoltaic sistemler ile gölgeli ortamı seven, uygun bitki seçilmesiyle bitki verimliliği artırılabilir.
- Agrivoltaic sistemler ile kullanılabilir tarım arazi alanları genişletilebilmektedir ve ayrıca üretilen mahsul miktarları da arttırılmaktadır.
- Agrivoltaic sistemler ile robotik ve otonom tarıma elverişli ortamlar elde edilebilir. Çelik konstrüksiyon arasında yetişen bitkilerin kontrolleri, ihtiyaç duydukları vitamin ve mineral oranları, mahsullerin toplanması gibi süreçler insan eli değmeden, çelik konstrüksiyonlara bağlı robotik sistemlerin hareketi ile sağlanabilir.
- Agrivoltaic sistemler mutual yani karşılıklı yarar sağlayan, kazan-kazan ilkesi ile ülkemizin âtl alanlarının tarıma kazandırılmasının yansısı, üretilen elektrik miktarının arttırılmasına da katkı sağlayabilir.
- Agrivoltaic sistemler ile artan nüfusun beslenme ve enerji ihtiyaçlarının karşılanmasının yanında, aynı alan üzerinde farklı iş kollarına (çiçfi, kaynak işçisi) istihdam alanları sağlayabilir.

2. Literatür Çalışması

Literatüre bakıldığı zaman bu konu üzerine çalışma yapan birçok araştırmacı bulunmaktadır. Ancak, ülkemizde tarım ve elektrik üretiminin aynı anda yapılabilirliğine olan ilgi başlangıç seviyesinde olup ilerleyen zamanlarda çalışmaların artacağı düşünülmektedir. Tabak A. ve Endiz M.S. tarafından ülkemizde yapılan bir çalışmada PVSOL simülasyon programı yardımıyla Van ve Antalya şehirlerimizin potansiyel elektrik üretimleri incelenmiş, sıcaklığın elektrik üretimi üzerindeki olumsuz etkileri vurgulanmıştır (Abdulsamet and Mustafa Sacid, 2016). Dinesh ve Pearce tarafından Agrivoltaic sistemlerin potansiyeli araştırılmış, tarımsal ürünlerde verim artışı gözlenmesinin yanında panel verimliliğinin de bu yöntemle arttığı ileri sürülmüştür (Dinesh and Pearce, 2016). Cho ve arkadaşları tarafından yapılan bir başka çalışma ise üzüm yetiştirilen bir arazi üzerinde beş aylık bir gözleme dayanmaktadır. Arazi ikiye bölünmüş olmak üzere üç bölgeye ayrılmıştır. Üç bölge olmasının sebebi, üç farklı yapıda fotovoltaik kullanılmasıdır, bunlar; normal, şeffaf ve çift taraflı fotovoltaik panellerdir. İkişerli grup olmasının sebebi her bir panel grubuna ait kontrol ve test gruplarının olmasıdır. Çalışmanın sonucunda panel verimliliklerinde ve ürünlerde dikkate değer bir farklılık gözlemlenmemiş, ancak test grupları altında yetişen üzümlerin gelişim süreçleri biraz uzamıştır. Üzümlerin içerdikleri şeker oranlarında da az miktarda değişim söz konusu olmuştur (Cho et al., 2020). Santra ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada 0.5MW'lık elektrik üretim tesisinde, panellerin temizlenmesi için gerekli olan su miktarının 20.000 litre kadar olduğu bahsedilmiş ve panel altında yetiştirilmeye çalışılan tarım

ürünlerinin bu temizlik amacı ile kullanılan sudan yararlanabileceği belirtilmiştir. Bu sayede kurak alanların da tarım için kullanılabilirliği belirtilmiştir (Santra et al., 2017). Goetzberger ve arkadaşı tarafından 1981 yılında önerilen PV panellerin en uygun pozisyonda yerleşimi ve panel aralarında tarım yapımı fikri Agrivoltaic sistemlerin öncülerindedir (Goetzberger and Zastrow, 1982). Dupraz ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada simülasyon teknikleri kullanılarak Agrivoltaic sistem kullanımı ile toprak verimliliğinin %70'lere kadar artırılabilirliği gösterilmiştir. Bununla birlikte panelin yerden yüksekliği, bitkilerin yeterli ışık alması ve topraktan havaya uçacak toz parçalarının panel verimliliğine etkisi açısından önemi ortaya konulmuştur (Dupraz et al., 2011). Bitki ıslağı ve elektrik üretim ilişkisi açısından en iyi şartların belirlenmesine yönelik yapılan bir başka çalışmada Marrou ve arkadaşları PV panellerinin yerleştirilmesi ve uygun açılarının belirlenmesi ile bitki ve panel verimliliklerinin maksimum seviyelere ulaşabileceği gösterilmiştir (Marrou et al., 2013).

Bu çalışmamızda, Agrivoltaic sistemler tanıtılarak, ülkemizdeki 50 MW üstü kurulu GES'lerin bulunduğu Konya, Kayseri, Ankara, Afyonkarahisar, Denizli ve Antalya şehirlerimizin potansiyel ışınım değerleri ve güneş yörünge hareket grafikleri kullanılarak ülkemizdeki Agrivoltaic sistemlerin genel bir değerlendirilmesi yapılmıştır. Ayrıca, "Agrivoltaic sistemlerin Türkiye'deki potansiyeli" ile "Türkiye'de güneş enerji potansiyeli" konuları başlıklar halinde sırası ile çalışmamızda verilmiştir. Ülkemizde, Agrivoltaic sistemlerin kullanımına yönelik deneysel herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu araştırmanın, ülkemiz literatürüne katkı sağlayacağı ve bu alanda çalışmak isteyen araştırmacılara farkındalık oluşturacağı düşünülmektedir.

3. Agrivoltaic sistemlerin Türkiye'deki potansiyeli

Agrivoltaic sistemler; aynı toprak parçası üzerinde fotovoltaik paneller ile bir yanda elektrik üretilirken bir yandan da panel aralarında veya alt taraflarında bitki yetiştirilmesine uygun alan oluşturan sistemler olarak tanımlanmaktadır. Ülkemiz ve dünyada 'ki hızlı nüfus artışı ve sınırlı su kaynakları ile birlikte sabit arazi alanları nedenleri ile toplumların beslenme ihtiyaçlarının karşılanmasında tarımın önemi artmış ve gelecekte de daha da artacaktır. Ülkemizdeki toplam iş gücünün %20'si ile gelirin %6,3'ünü üstlenen, bununla birlikte çevre ve doğal kaynakların korunmasında rol alan ve ihracat gelirlerimize katkı sağlayan tarım sektörü stratejik öneme sahiptir (Yavuz, 2019). Enerji sektörü ile tarım sektörünün birlikte düşünülmesi karşılıklı kazanım açısından oldukça kazançlı olacağı düşünülmektedir. Agrivoltaic sistemlerde fotovoltaik panellerin yerden yükseklikleri, yetiştirilecek bitki türlerinin kapladıkları alan ve boyları dikkat edilmesi gereken önemli hususlardır. Şekil 1.'de Agrivoltaic sistem yapılarının gösterimi verilmektedir.



Şekil 1. Agrivoltaic sistemin genel yapısı (Dos Santos, 2020)

Agrivoltaic sistemlerde kullanılacak üç çeşit panel tipi vardır (Cho et al., 2020). Birincisi normal PV panelleri, Monokristal, Polikristal, İnce Film Güneş Panelleri, vb. çeşitleri vardır. İkincisi iki yüzeysel güneş panelleri, üçüncüsü ise şeffaf güneş panelleridir. Şeffaf güneş panelleri güneşten gelen ışıkların bir kısmını arka tarafına geçirebilen özelliktedir. Bunun neticesinde Agrivoltaic sistemlerde sadece gölgeyi seven bitkilerin üretimi yapılmayıp, güneş ışınımına daha fazla ihtiyacı olan bitki türlerinin de yetişmesine imkân tanınmaktadır. Güneş ışığı ile bitki gelişimi arasında önemli bir bağ vardır. Bazı bitkiler yoğun güneş ışığı altında, bazıları ise gölgelik alanda en iyi gelişim göstermektedirler. Işığı seven bitkiler için ışık kompensasyon değeri 4200lux iken gölgeyi seven bitkiler için bu değer 27lux'dur. Agrivoltaic sistemler ile Dünya'da yaygın olarak marul, biber, domates, aloe vera, mısır ve mera otları bu yöntem kullanılarak başarıyla yetiştirilmektedir (Adeh et al., 2018; Ravi et al., 2016; Weselek et al., 2019). Ülkemizde yetiştirilen ve ışık ihtiyaçlarına göre sınıflandırma yapılabilen bitkiler aşağıda maddeler halinde verilmiştir ("Tarımsal ekoloji," n.d.).

- Işık gereksinimi olana bitkiler: Marul, sığır kuyruğu, tütün, yüksük otu, adi litrum
- Işık gereksiniminin mutlak olmadığı ancak çimlenmeye destek olan bitkiler Havuç, buğdaygillere ait çoğu bitki
- Karanlık ortama gereksinim duyan bitkiler: Vanilya, çuha çiçeği, zambakgiller familyası bitkileri
- Karanlıkta daha iyi çimlenebilen bitkiler: Kültür bitkilerinin çoğunluğu, domates, brom türleri, şeytan elması, bu grupta yer alır.

Ülkemizin 2017 yılı verilerine göre bitkisel üretim değeri 135milyar TL'dir. Bu üretim; %41 oranında tahıllar ve diğer bitkisel ürünlerden, %34 oranında meyve ve baharat bitkilerinden ve %25 oranında sebzelerden oluşmaktadır (Yavuz, 2019).

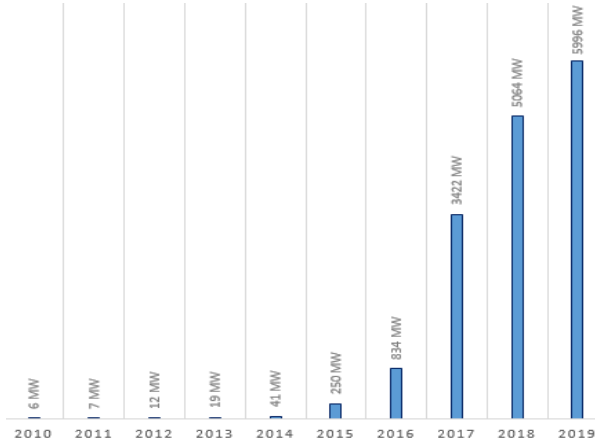
Tablo 1. 2018-2019 Tarım verileri

Ürün Grubu	2018	2019
Tarla bitkileri	62.935.629	63.835.101
Meyveler	20.494.028	20.578.453
Sebzeler	30.032.827	31.089.644

Kaynak: TÜİK

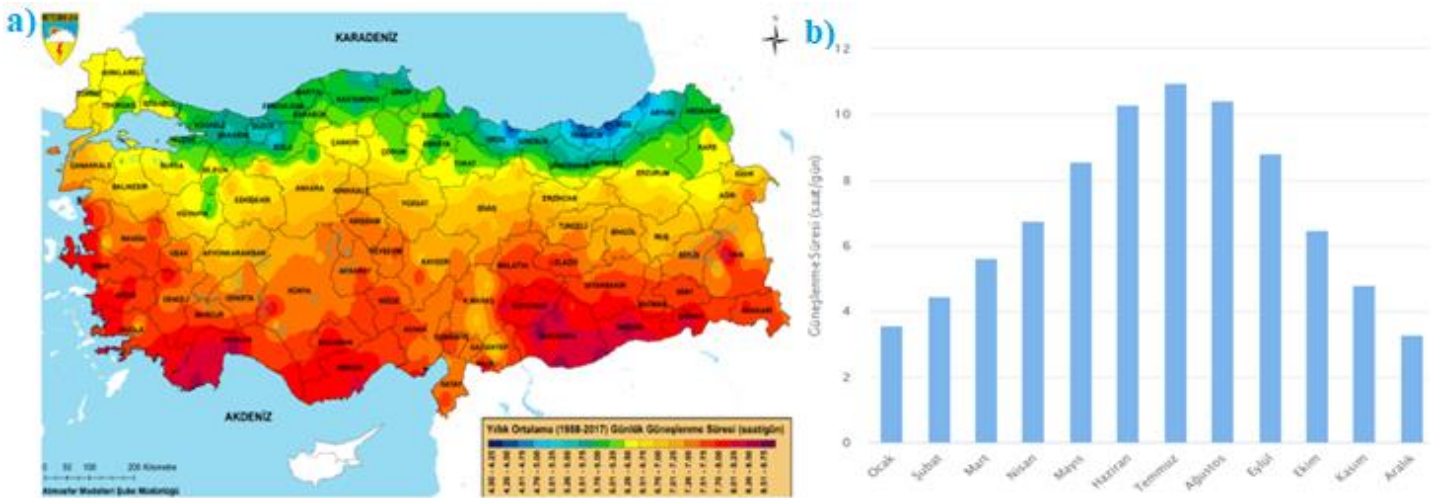
4. Türkiye’de Güneş Enerji Potansiyeli

2018 yılında tüm dünyada kurulan 512.3GW fotovoltaik tesisten 670TWh elektrik üretildiği tahmin edilmektedir. Bu rakam, dünyada tüketilen toplam elektriğin% 3’üne karşılık gelmektedir (IEA PVPS task 1 et al., 2020). Şekil 2.’de ülkemizde 2010-2019 yılları arası güneş enerjisinden üretilen elektrik miktarı verilmektedir. Güneş Enerji Santrallerinden 2019 yılı içerisinde yaklaşık 9.620.335.000 kilovatsaat elektrik üretimi gerçekleştirilmiştir (“Güneş Enerji Santralleri,” n.d.).



Şekil 2. Yıllara göre Güneş enerjisinden yararlanma miktarları

Türkiye coğrafi yer açısından avantajlı bir konumdadır. Bu avantaj sadece kıtalar arası transit geçiş güzargahı ile sınırlı kalmayıp güneşli gün sayısının fazla olmasında etkindir. Ülkemiz, güneşli gün sayısı açısından kendisine en yakın avrupa ülkeleri olan Fransa ve İspanya’dan %30 oranında daha fazla güneş ışınım potansiyeline sahiptir. Oranlandığı zaman bu potansiyel mevcut elektrik talebinin %75’inin güneş enerjisiyle karşılanabileceğini göstermektedir (Uğuz et al., 2019). Ülkemizde güneşlenme ışınımına maruz kalma potansiyeli Güney bölgelerden Kuzeylere gidildikte azalmaktadır. Yağmurlu Gün sayısının fazla oluşu ve kuzeyde yer alması sebebiyle Karadeniz bölgesi en az güneş ışığı alan coğrafik bölgemizdir. Yüksek seviyelerde güneş ışığından yararlanan coğrafik bölgelerimiz ise; Ege bölgesinin güney kesimleri ile, İç Anadolu, Doğu Anadolu, Akdeniz ve Güneydoğu Anadolu bölgesidir. Şekil 3’de Meteoroloji genel müdürlüğü’nün internet sayfasından alınmış Türkiye’nin yıllık ortalama günlük güneşlenme süresi verilmiş harita ile birlikte aylara göre dağılmış ortalama güneşlenme süre grafiği verilmiştir.

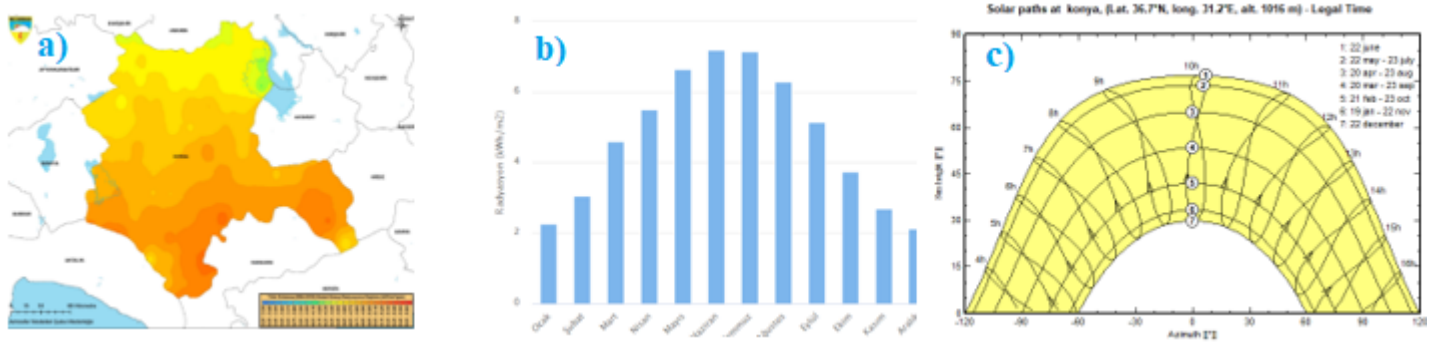


Şekil 3. (a) Türkiye’nin yıllık ortalama günlük güneşlenme süresi; (b) Türkiye’nin aylara göre güneşlenme süre dağılımı

Güneş Enerji Santrallerinden toplamda 50MW üstü üretim gerçekleştirilen Konya, Kayseri, Ankara, Afyonkarahisar, Denizli ve Antalya vb., şehirlerimiz için aşağıda güneş enerji potansiyelleri, aylara göre ortalama güneşlenme miktarları ve azimut açısı verilmiştir. Azimut açısı güneşin yeryüzüne izdüşümünün, güney referansa olan açılal değeri olarak adlandırılmaktadır. Güneş panellerinin güneye olan referansları verimlilikleri açısından önemlidir. Fotovoltaik sistemler için Azimut değeri 0° ye yaklaştıkça verimlilikleri en yüksek seviyelerdedir denilebilir. Açılal Güneş hareketleri ile Güneşin gün doğumundan gün batımına kadar olan azimut açılal değışimleri verilmektedir.

Konya

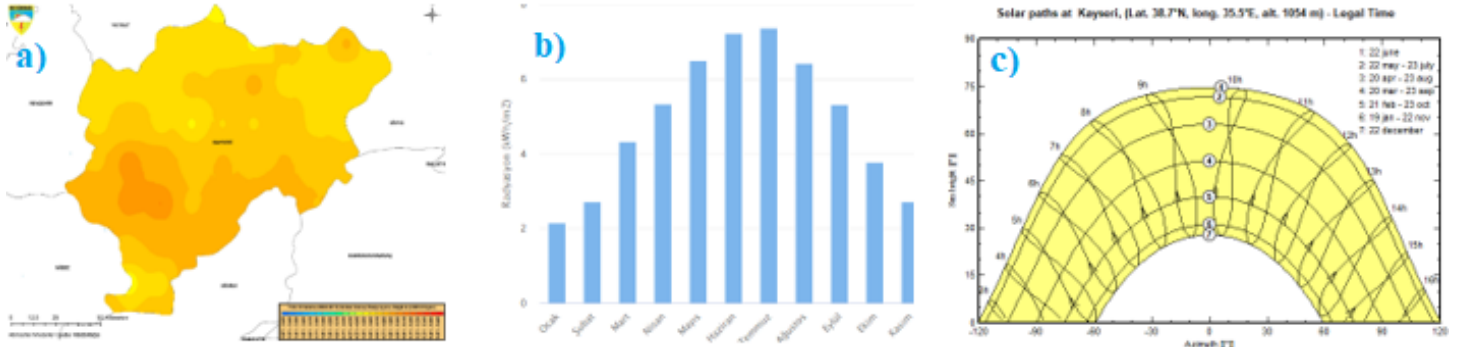
Konya ili, deniz seviyesinden 1029 m yükseklikte yer almakta ve step iklimi görülmektedir. Konya ilinde yıl boyunca az miktarda yağış görülmektedir. Yıllık ortalama sıcaklığı 12.2 °C ve yıllık yağış miktarı 326 mm'dir. Şekil 4.'de Konya ilinin güneş enerjisi potansiyeli, aylara göre güneşlenme miktarı, ve açılal güneş hareketleri verilmektedir.



Şekil 4. Konya ilinin a) güneş enerjisi potansiyeli, b) aylara göre güneşlenme miktarı, c) açılal güneş hareketleri

Kayseri

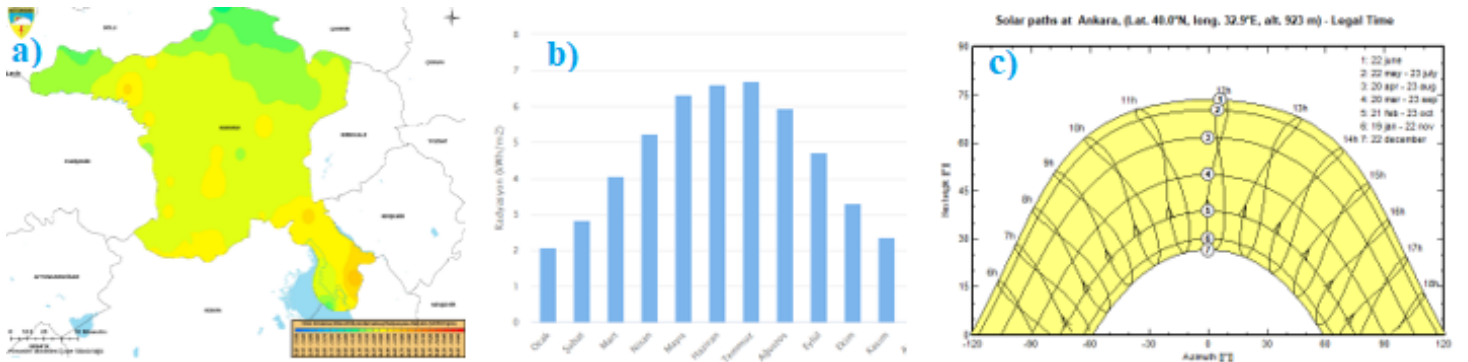
Kayseri deniz seviyesinden 1057 m yükseklikte yer almaktadır. Sıcak ve ılıman bir iklime sahiptir. Kış aylarında yaz aylarından çok daha fazla yağış düşmektedir. Yıllık ortalama sıcaklığı 10.5 °C ve yıllık ortalama yağış miktarı: 564 mm'dir. Şekil 5.'de Kayseri ilinin güneş enerjisi potansiyeli, aylara göre güneşlenme miktarı, ve açılal güneş hareketleri verilmektedir.



Şekil 5. Kayseri ilinin a) güneş enerjisi potansiyeli, b) aylara göre güneşlenme miktarı, c) açılal güneş hareketleri

Ankara

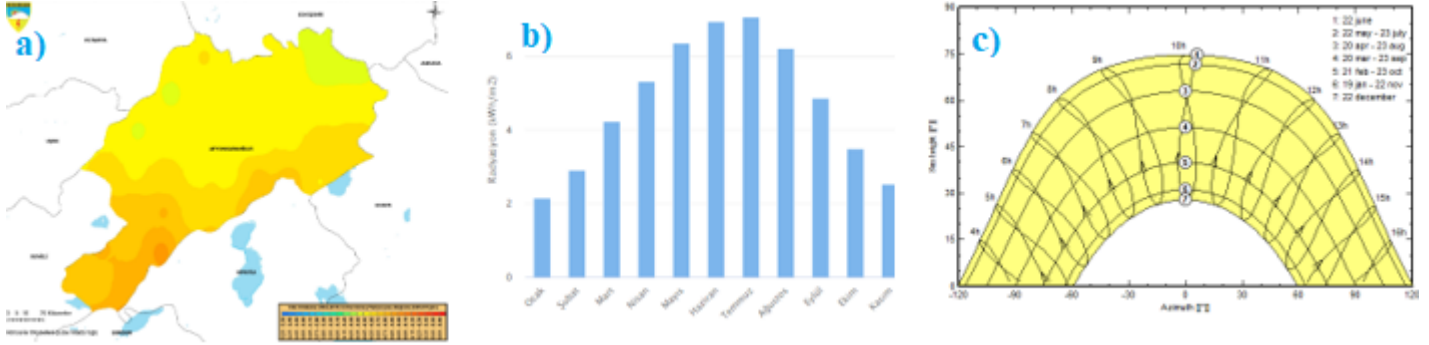
Ankara deniz seviyesinden 874 m yükseklikte yer almaktadır. Sıcak ve ılıman bir iklime sahiptir. Kış aylarında yaz aylarından çok daha fazla yağış düşmektedir. Ankara ilinin yıllık ortalama sıcaklığı 11.5 °C ve yıllık ortalama yağış miktarı: 451 mm'dir. Şekil 6.'da Ankara ilinin güneş enerjisi potansiyeli, aylara göre güneşlenme miktarı, ve açılal güneş hareketleri verilmektedir.



Şekil 6. Ankara ilinin a) güneş enerjisi potansiyeli, b) aylara göre güneşlenme miktarı, c) açılal güneş hareketleri

Afyonkarahisar

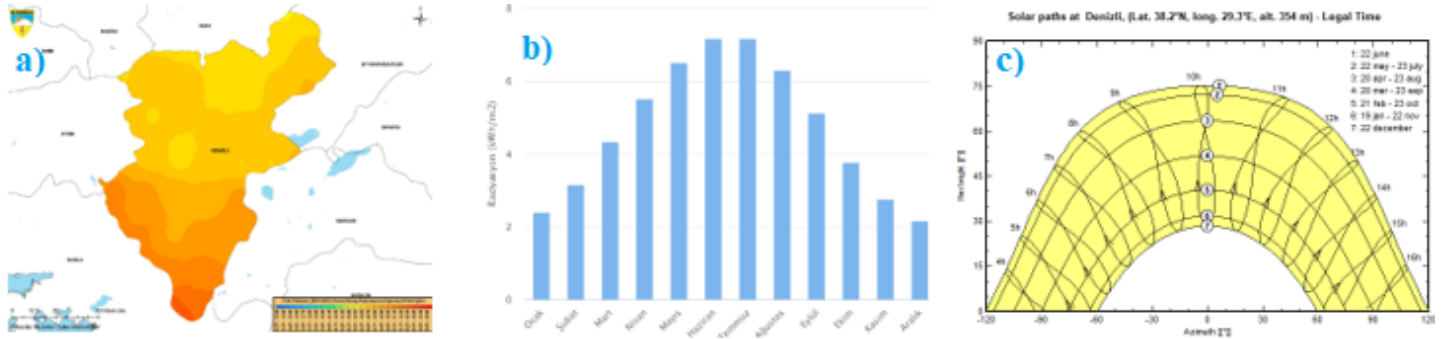
Afyonkarahisar deniz seviyesinden 1026 m yükseklikte yer almaktadır. Sıcak ve ılıman bir iklime sahiptir. Kış aylarında yaz aylarından çok daha fazla yağış düşmektedir. Afyonkarahisar ilinin yıllık ortalama sıcaklığı 11.0 °C ve yıllık ortalama yağış miktarı: 466 mm'dir. Şekil 7.'de Afyonkarahisar ilinin güneş enerjisi potansiyeli, aylara göre güneşlenme miktarı, ve açılal güneş hareketleri verilmektedir.



Şekil 7. Afyonkarahisar ilinin a) güneş enerjisi potansiyeli, b) aylara göre güneşlenme miktarı, c) açılal güneş hareketleri

Denizli

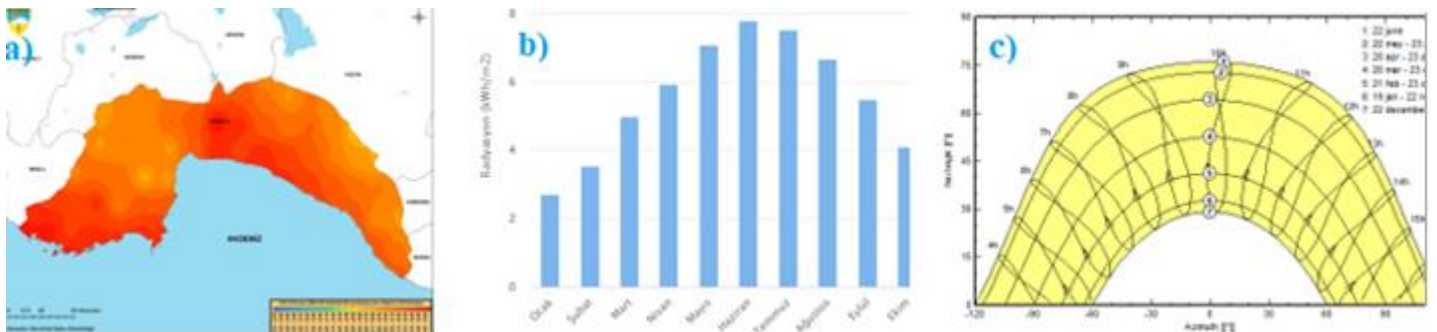
Denizli deniz seviyesinden 405 m yükseklikte yer almaktadır. Sıcak ve ılıman bir iklime sahiptir. Denizli Kış aylarında yaz aylarından çok daha fazla yağış düşmektedir. Denizli ilinin yıllık ortalama sıcaklığı 16.5 °C ve yıllık ortalama yağış miktarı: 474 mm'dir. Şekil 8.'de Denizli ilinin güneş enerjisi potansiyeli, aylara göre güneşlenme miktarı, ve açılal güneş hareketleri verilmektedir.



Şekil 8. Denizli ilinin a) güneş enerjisi potansiyeli, b) aylara göre güneşlenme miktarı, c) açılal güneş hareketleri

Antalya

Antalya deniz seviyesinden 57 m yükseklikte yer almaktadır. Sıcak ve ılıman bir iklime sahiptir. Antalya Kış aylarında yaz aylarından çok daha fazla yağış düşmektedir. Antalya ilinin yıllık ortalama sıcaklığı 17.8 °C ve yıllık ortalama yağış miktarı: 1081 mm'dir. Şekil 9.'da Antalya ilinin güneş enerjisi potansiyeli, aylara göre güneşlenme miktarı, ve açılal güneş hareketleri verilmektedir.



Şekil 9. Antalya ilinin a) güneş enerjisi potansiyeli, b) aylara göre güneşlenme miktarı, c) açılal güneş hareketleri

5. Sonuçlar

Küresel bir sorun olan iklim değişikliği ve kuraklık ülkemizde olumsuz etkilemektedir. Her geçen gün önemini daha çok hissettiğimiz su kaynaklarımızın tükenmemesi için ulusal ve uluslararası çapta çalışmalar yürütölmektedir. Sürdürülebilir tarım için su kaynaklarına erişim oldukça önemlidir. Bunun yanında nüfusumuzun yıllık yaklaşık %13,9 arttığı bir ortamda temiz ve yenilenebilir enerji temininde bir o kadar önemlidir. Ülkemiz yıllık güneşli gün sayısı ve tarım açısından oldukça zengin bir ülkedir. Bu zenginliğin iyi değerlendirilip kıymetinin bilinmesi gerekmektedir. Avrupa ülkelerinden Almanya, Güneş enerji potansiyeli olarak Türkiye'nin Güneşlenme potansiyelinin yarısından daha az miktarda bir potansiyele sahip olmasına rağmen 2019 yılı itibari ile Türkiye'den yaklaşık 6 kat daha fazla güneşten elektrik ürettiği bilinmektedir. Ayrıca, Tarım arazilerinin ülke yüz ölçümleri ile oranına bakacak olunursa Türkiye'nin yaklaşık %34'ü tarım arazisi iken, Almanyanın yaklaşık %33'ü tarım arazisidir. Güneşlenme potansiyeli açısından yarıdan daha az bir güneşlenme oranına sahip bir ülke ile ülkemiz hemen hemen eşit tarım arazi oranlarına sahiptir. Fotovoltaik paneller altında gölgeleme doğal bir sonuçtur. Bu nedenle tarım ürünlerinin gölge toleransını, yani düşük ışık seviyelerini tolere etme yeteneklerini tam olarak bilmek önemlidir. Bazı tarım ürünleri için büyüme hızlarının gölgelik alanda azalmadığı bilinmektedir. Ülkemizde yetiştirilen ve ışık ihtiyaçlarına göre sınıflandırma yapılabilen bitkilerin çeşitliliği fazladır.

Nüfusun hızlı arttığı ve tarım arazilerinin sınırlı olduğu coğrafyamızda Agrivoltaic sistem kullanımı ve teşviki oldukça önem arz etmektedir. Ayrıca, ülkemizde üretim yüzdeleri fazla olan tahıl ve bitkisel ürünlerin, güneş ışığına ihtiyaçları göz önünde bulundurularak bu yöntem ile tarımsal ürünlerin üretilebileceği bilinmektedir. Şehirlerimiz için aylara göre güneşlenme süreleri arasında çok büyük farklılık bulunmamaktadır. Agrivoltaic sistemlerde normal, iki-yüzlü veya şeffaf paneller kullanılarak, yetiştirilmesi planlanan tarımsal ürünlere göre santrallerin kurulması mümkün gözökmektedir. Böylelikle ülke sınırları içerisinde yer farketmeksizin Agrivoltaic sistem kullanılarak herhangi bir tarımsal ürün yetiştirilebileceği düşünülmektedir. Bu durum bizlere; ürünlerde rekolte artışı, tarımsal arazilerin artırılması, optimum seviyede enerji dönüşümü, tarımda veya fotovoltaik panel temizlemede kullanılacak suda tasarruf, vb. gibi konularda kazanç sağlatacaktır.

Referanslar

- Abdölsamet, T., Mustafa Sacid, E., 2016. the Comparative Analyzes of Solar Energy Production Potential Between Van and Antalya Using Pvsol Simulation Tool. i-manager's J. Instrum. Control Eng. 4, 1. <https://doi.org/10.26634/jic.4.3.7061>
- Adeh, E.H., Selker, J.S., Higgins, C.W., 2018. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. PLoS One 13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>
- Aksungur, K.M., Kurban, M., Filik, Ü.B., 2009. Türkiye'nin Farklı Bölgelerindeki Güneş Işınım Verilerinin Analizi ve Değerlendirilmesi. Enerj. Veriml. ve Kalitesi Sempozyumu 3–6.
- Cho, J., Park, S.M., Reum Park, A., Lee, O.C., Nam, G., Ra, I.H., 2020. Application of photovoltaic systems for agriculture: A study on the relationship between power generation and farming for the improvement of photovoltaic applications in agriculture. Energies 13, 1–18. <https://doi.org/10.3390/en13184815>
- Demir, H., 2020. FREQUENT FAULTS ON THE DC SIDE IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS, First Edit. ed. Gece Kitaplığı, Ankara.
- Dinesh, H., Pearce, J.M., 2016. The potential of agrivoltaic systems. Renew. Sustain. Energy Rev. 54, 299–308. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024>
- Dos Santos, C.N.L., 2020. Agrivoltaic system: a possible synergy between agriculture and solar energy 42.
- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., Ferard, Y., 2011. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. Renew. Energy 36, 2725–2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>
- Goetzberger, A., Zastrow, A., 1982. On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. Int. J. Sol. Energy 1, 55–69. <https://doi.org/10.1080/01425918208909875>
- Güneş Enerji Santralleri [WWW Document], n.d. URL <https://www.enerjiatlasi.com/gunes/>
- IEA PVPS task 1, Masson, G., Kaizuka, I., Bosch, E., Detollenaere, A., Neubourg, G., van Wetter, J., Lindahl, J., 2020. Trends in Photovoltaic Applications 2020.
- Marrou, H., Wery, J., Dufour, L., Dupraz, C., 2013. Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. Eur. J. Agron. 44, 54–66. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.08.003>
- Ravi, S., Macknick, J., Lobell, D., Field, C., Ganesan, K., Jain, R., Elchinger, M., Stoltenberg, B., 2016. Colocation opportunities for

- large solar infrastructures and agriculture in drylands. *Appl. Energy* 165, 383–392. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.078>
- Santra, P., Pande, P.C., Kumar, S., Mishra, D., Singh, R.K., 2017. Agri-voltaics or solar farming: The concept of integrating solar PV based electricity generation and crop production in a single land use system. *Int. J. Renew. Energy Res.* 7, 694–699.
- Tarimsal ekoloji [WWW Document], n.d. URL [http://www.bingol.edu.tr/documents/Tarimsal Ekoloji.pdf](http://www.bingol.edu.tr/documents/Tarimsal_Ekoloji.pdf)
- Uğuz, S., Çağlayan, N., Oral, O., 2019. PV Güç Santrallerinden Elde Edilecek Enerjinin Makine Öğrenmesi Metotları Kullanılarak Tahmin Edilmesi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Derg.* 11, 769–779.
- Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., Högy, P., 2019. Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 39. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>
- Yavuz, F., 2019. Türkiye tarımına yeniden bakış.



Kablosuz Sensör Ağlarında Parçacık Sürü Optimizasyonu, Sürekli Zaman Karınca Koloni Algoritması ve Girdap Arama Algoritması Yöntemleri ile Konum Belirleme

Localization with Particle Swarm Optimization, Continuous Time Ant Colony Algorithm and Vortex Search Algorithm Methods in Wireless Sensor Networks

Feyza Nur Çakıcı¹ , Tolga Eren¹ 

¹ Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektornik Mühendisliği Bölümü, 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 21/04/2021

Kabul / Accepted: 10/06/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 18/06/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Günümüzde kablosuz sensör ağlarının (KSA) kullanım alanları artması ile birlikte önemli bir konu haline gelmektedir. Doğada bulunan canlıların hareketlerinin izlenmesi, akıllı ev sistemleri, hava durumu tahminleri, askeri operasyonlar, sağlık alanları gibi birçok uygulamalarda sensör düğümleri kullanılmaktadır. KSA' ların kullanım alanları arttıkça sensörlerinin konumu doğru, hızlı ve güvenilir bir şekilde tespit edilmesi önemlidir. KSA' ların konumu belirlenmesi optimizasyon problemi olarak ele alınmıştır ve en az hata ile belirlenmesi için birçok farklı optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Makalede Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization-PSO), Sürekli Zaman Karınca Koloni Algoritması (Ant Colony Optimization for Continuous Domains -ACO_R) ve Girdap Arama Algoritması (Vortex Search Algorithm-VSO) kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Matlab ortamında test sistemine uygulanmış sonuçlar tablolar halinde ifade edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“PSO, ACO_R, VSO, Kablosuz sensör ağlar konum belirleme problemi”

Abstract

Today, with the increase in usage areas of wireless sensor networks (KSA), it is becoming an important issue. Sensor nodes are used in many applications such as monitoring the movements of living thing in nature, smart home systems, weather forecasts, military operations, health areas. As the usage areas of KSA' s increase, it is important to determine the location of the sensors accurately, quickly and reliably. Determining the location of KSA' s is considered as an optimization problem and many different optimization methods have been used to determine the with the least error. The article compares the results obtained using Particle Swarm Optimization (PSO), Ant Colony Optimization for Continuous Domains (ACO_R) and Vortex Search Algorithm (VSO). It is applied to the test system in Matlab environment and the results are expressed in tables.

Key Words

“PSO, ACO_R, VSO, Positioning problem in wireless sensor networks”

1. Giriş

Radyo Frekans (RF) ve Mikroelektronik Sistemlerin (MEMS) gelişmesiyle birlikte sensörlerin boyutları küçülmüş ve güç tüketimi azalmıştır.

Kablosuz sensör ağları (KSA) başlangıçta askeri alanlar için kullanılmış ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte enerji, tarım, sağlık, çevre, ev ve ofis gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Ayrıca sensörlerin güvenilir olması, göreceli olarak daha az maliyetli olması, esnekliği, doğruluğu ve kurulum açısından kolay olması gibi avantajları sayesinde günümüzde çok tercih edilmektedir (Doğru, 2019). Kablosuz sensör ağlarında iletişim çift taraflı olduğu için veriyi alma, iletme ve yorumlama özellikleri bulunmaktadır.

KSA'da sensör düğümleri, izlenecek ve takip edilecek coğrafik alanlara rastgele dağıtılmakta ve elde edilen veriler üç aşamada gerçekleştirilmektedir. Birinci aşamada, sensör tarafından olaylar algılanmakta ve veriler her bir sensör tarafından ayrı ayrı işlenmektedir. İkinci aşamada, işlenen veriler komşu sensörlere iletilmektedir. Üçüncü ve son aşamada ise veriler baz istasyonuna gönderilmektedir.

KSA'da birden fazla düğüm bulunmaktadır. Bu düğümler, sensör (algılama) birimi, işlemci birimi, alıcı-gönderici (telsiz) birimi ve güç birimi olmak üzere dört ana bölümden meydana gelmektedir. KSA'da yer alan sensör düğümlerinin boyutları küçüktür ve daha az enerji kullanmaktadır. Sensör düğümleri, sensörler aracılığıyla veriyi toplayabilme, işleyebilme ve haberleşme yapabilme özelliklerine sahiptir. Sensör düğümlerinde, konumu bilinen ve konumu bilinmeyen düğümler bulunmaktadır. Konumu bilinen sensör düğümler "referans (çapa) düğüm", konumu bilinmeyen sensör düğümleri ise "hedef düğüm" olarak adlandırılmaktadır. Çapa düğümlerin sayısı hedef düğümlerin sayısına göre nispeten azdır. Çapa düğümlerin konumu GPS aracılığıyla veya manuel olarak belirlenebilmektedir. GPS tekniği hem maliyetlidir hem de enerji tüketimi fazladır. Ayrıca dağlar, bitki örtüsü veya binalar GPS uydularının görüntülenmesini engellediği için hedef düğümlerin konunun belirlenmesinde tercih edilmemektedir. Hareketli yapıya sahip sensörlerin ortama rastgele dağıtılması durumunda manuel olarak konum tespiti yapılamaz. Bu durumda hedef düğümlerin konumlarını belirlemek için GPS veya manuel yerine farklı yöntemler kullanılmaktadır. Konumu bilinmeyen hedef düğümlerin, çapa düğümleri ve hedef düğümleri arasındaki mesafe hesaplanarak konumu bulunmaktadır. Bu yöntem network localization (ağ konumu belirleme) olarak adlandırılmaktadır (Eren, et al., 2004).

KSA birçok alanda kullanıldığı için konum belirleme problemi önemli bir noktadır. Yapılan çalışmalarda KSA konum problemi bir optimizasyon problemi olarak yer almaktadır. Hedef düğümlerin konumunun belirlenmesinde farklı algoritmalar kullanılmıştır. Literatürde yer alan çalışmaların bir kısmına açıklamaları ile birlikte yer verilmektedir.

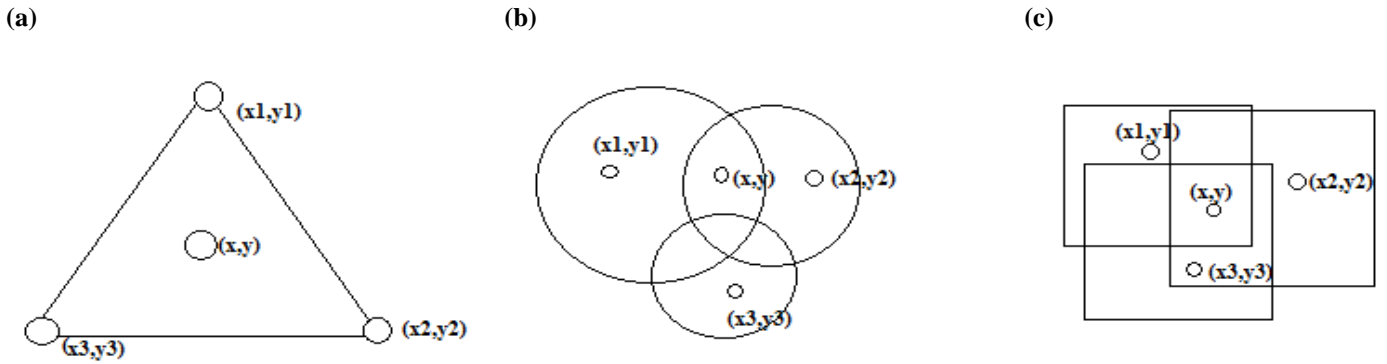
W. Chengqun, ve arkadaşları (2009) kablosuz sensör ağlarında konum belirleme sorunu için izomap algoritmasını ele almıştır. İzomap algoritması sensörler arasındaki farklılığı ölçmek için jeodezik mesafeyi kullanmıştır. Resul Doğan, (2018) yüksek lisans tezinde KSA ile konum belirlemede Sinyal Alım Gücü (RSS) değeri ile Yapay Sinir Ağ (YSA) yaklaşımını ele almıştır. YSA'nın RSS ile konum bulmada, Bounding Box'a göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Güngör Yıldırım, (2012) KSA konum belirlemede Bounding Box metodu kullanmıştır. H. Cui ve arkadaşları, (2018) büyük ölçekli kablosuz sensör ağlarında konum belirleme probleminde Niching Parçacık Sürü Optimizasyonu ve güvenilir çapa seçimini kullanmıştır. Bu çalışmada PSO ile daralma katsayısı (PSO with constriction coefficient-CPSO) kullanımının sağladığı avantaj sayesinde daha az iterasyon ile konum belirlenebilmiştir. Celal Öztürk, (2016) tarafından sunulan proje çalışmasında KSA ile konum belirlemede Yapay Arı Koloni Algoritması (Artificial Bee Colony Algorithm-ABC) kullanılmıştır. Projede PSO ile ABC algoritmaları karşılaştırılmıştır. ABC algoritması ile daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir. A.S. Doğru ve arkadaşları (2019) tarafından yapılan çalışmada, KSA konum belirleme için PSO ve Yarasa Algoritmasının (Bat Algorithm-BA) simülasyon sonuçları karşılaştırılmış ve PSO ile daha iyi değerler elde edildiği gözlenmiştir. N. Bacanin ve arkadaşları Balina Optimizasyon Algoritması (Whale Optimization Algorithm-WOA) kullanarak KSA konum belirleme problemini iyileştirmeyi başarmıştır. S. Ivana ve arkadaşları (2018) ise KSA konum belirleme problemi için Fil Sürü Optimizasyon Algoritmasını (Elephant Herding Optimization Algorithm-EHO) kullanmıştır. EHO'nun sağlam ve verimli bir meta-sezgisel algoritma olduğu sonucuna varılmıştır. A. Kumar ve arkadaşları (2012) H-Best Parçacık Sürüsü Optimizasyon Algoritması (H-Best Particle Swarm Optimization Algorithm -HPSO) ve Biyoloji Tabanlı Optimizasyon (Biogeography-Based Optimization-BBO) Algoritmalarını kullanmıştır. KSA konum belirleme problemi için Genetik Algoritma ve Benzetimli Tavlam Algoritması (Simulated Annealing Algorithm-SAA) karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Son olarak S. Gayal ve M.S. Patterh, (2015) KSA konum belirleme sorunu için Çiçek Tozlaşma Algoritmasını (Flower Pollination Algorithm-FPA) kullanmış, çalışma PSO ile karşılaştırıldığında daha iyi konum belirleme doğruluğuna sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada KSA konum belirleme problemi için PSO, ACO_R ve VSO algoritmaları kullanılmıştır. PSO, ACO_R ve VSO algoritmalarında elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Makalenin 2. bölümünde konum belirleme problemi ve hata fonksiyonu ele alınmıştır. 3. bölümde kullanılan optimizasyon algoritmaları hakkında bilgi verilmiştir. 4. Bölümde elde edilen sonuçlar şekil ve tablolar halinde gösterilmiş ve son olarak 5. bölümde ise yapılan çalışmaların sonuçları karşılaştırılmıştır.

2. KSA' lar da Konum Belirleme Problemi ve Hata Fonksiyonu

KSA'lar birçok alanda uygulanabildiği için sensör düğümlerin konumlarının tespiti için önemli hale gelmiştir. KSA' da konumu bilinmeyen sensörlerin yerini tespit etmek için çeşitli metotlar kullanılmaktadır. GPS kullanmadan sensörlerin yeri tespit edilmektedir. Konum belirleme metotları, mesafeye bağımlı konum bulma ve mesafeden bağımsız konum bulma yöntemleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Mesafeye bağımlı ve mesafeden bağımsız konum bulma yöntemleri ise çapaya bağlı veya çapadan bağımsız olmak üzere iki farklı şekilde hesaplanmaktadır. Mesafeye bağımlı yöntemde sensör düğümleri arasındaki uzaklığı hesaplanmasıyla konum bulunmaktadır. Mesafe hesaplanmasında üçgen, daire ve dikdörtgen gibi geometrik yapılar kullanılmaktadır. Mesafeye bağımlı konum belirleme yönteminde elde edilen hata oranı daha azdır ve mesafe hesaplama iki süreçten meydana gelmektedir. Birinci süreç sensör düğümler ile çapa düğümleri arasındaki mesafenin hesaplanmasıdır.

İkinci süreç ise mesafe Time of Arrival (ToA), Time Difference of Arrival (TDoA), Gelen Sinyalin Gücüne Bağlı Mesafe Tahmini (RSSI), Angel of Arrival (AoA) ve İletim Aralığı yöntemleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Mesafeden bağımsız konum belirleme yöntemi basit bir yapıdır ve daha az maliyete sahiptir ancak hata oranı yüksektir. Bu yöntemde konum Dv-Hop, Amorphus, Apıt ve Centroid yöntemleri kullanılarak bulunmaktadır. İletim aralığı diğer yöntemlerle kıyaslandığında daha basittir, ekstra bir donanım gerektirmediği için maliyeti daha azdır. İletim aralığı azaldıkça hata oranı artmaktadır. Hedef sensörlerin konumlarını belirlemek için hangi yöntemlerin kullanılması önemli bir noktadır.



Şekil 1.(a) Üçgen algoritmali mesafeye bağımlı konum belirleme; (b) Dairesel algoritmali mesafeye bağımlı konum belirleme; (c) Dikdörtgen algoritmali mesafeye bağımlı konum belirleme (Bekçibaşı & Tenruh, 2012)

Şekil 1'de mesafe hesaplanmasında kullanılan üçgen, daire ve dikdörtgen yapılar gösterilmiştir. Sensör düğümlerinin konumunu belirlemek için 2-boyutlu uzayda en az 3 tane, 3-boyutlu uzayda ise en az 4 tane konumunu bildiğimiz çapa (referans) düğümü gereklidir. Çapa düğümü ile hedef düğümlerin, komşularına olan mesafe hesaplanarak sensörlerin konumu belirlenmektedir.

KSA'lar da konum belirleme probleminde M adet çapa düğümü ve N adet hedef düğümü olduğunu düşünürsek, çapa düğümlerin koordinatları (x_i, y_i) ve hedef düğümlerin koordinatları (x_j, y_j) şeklinde gösterilmektedir.

Gerçek uzaklık aşağıdaki denklem (1) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (1)$$

Bu denklemde (x, y) hedef düğümlerin, (x_i, y_i) ise çapa düğümlerin koordinatlarını ve d_i gerçek uzaklığı ifade etmektedir.

Tahmini uzaklık (d_{in}), gerçek uzaklığa (d_i) gürültü eklenerek bulunmaktadır. Tahmini uzaklık denklem (2) ile elde edilmektedir.

$$d_{in} = d_i + n_i \quad (2)$$

Denklem 2'de i . çapa düğümüne kadar elde edilen tahmini mesafenin denklemi gösterilmiştir.

Konum belirleme problemi makalede optimizasyon problemi olarak ele alınmıştır. Burada amaç, gerçek mesafe ile tahmini mesafe arasındaki farkı azaltmaktır. Denklem 3'te amaç fonksiyonu verilmiştir.

$$f(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - d_{in})^2 \quad (3)$$

Hata fonksiyonu (E) sezgisel algoritmalar kullanılarak minimize edilmektedir. Hata fonksiyonu, tahmin edilen düğümler ile gerçek düğümler arasında hesaplanmaktadır. Hata fonksiyonu pozitif bir değer almakta ve optimum değer hata fonksiyonunun sıfıra yaklaşması ile elde edilmektedir. Hata fonksiyonu denklem (4) ile hesaplanmaktadır.

$$E = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sqrt{(x_i - X_i)^2 + (y_i - Y_i)^2} \quad (4)$$

Denklemden k hedef düğüm sayısını, (x_i,y_i) gerçek düğümü ve (X_i,Y_i) tahmin edilen düğümü ifade etmektedir.

3. Konum Belirlemede Kullanılan Yöntemler

Kablosuz sensör ağlarında konum belirlemek için PSO, ACO_R ve VSO algoritmaları kullanılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. PSO, ACO_R ve VSO algoritmaları hakkında detaylı bilgi aşağıda sunulan başlıklar altında verilmiştir.

3.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

PSO algoritması Kennedy ve Eberhart (1995) tarafından balık ve kuşların yiyecek araması ve tehlikelerden kaçması sırasında sürü halinde hareket etmesinden esinlenerek geliştirilen bir algoritma türüdür. PSO algoritması sürü zekâsına dayanmaktadır. Kuş ya da balık popülasyonunda bulunan her bir bireye parçacık denmektedir. Parçacıkların meydana getirdiği topluluğa sürü adı verilmektedir. Yiyecek arama esnasında yiyeceğe en yakın kuşu diğer kuşlar takip etmekte ve yiyeceğe en yakın kuş lider kuş olarak adlandırılmaktadır. Sürüde yer alan lider kuş değişebilmektedir. Parçacıklar arama uzayına rastgele dağıtılmaktadır. Parçacığın en iyi konumu yiyecek arama sırasında kendisinin önceki tecrübelerinden ve sürüde yer alan parçacıkların tecrübelerinden yararlanarak bulunmaktadır. Parçacıklar arasında sosyal veri paylaşımı bulunmaktadır.

PSO algoritması ilk önce doğrusal olmayan sürekli optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılırken yapılan modifikasyonlar ile daha karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılmıştır. PSO algoritmasına yakınsama hızını iyileştirmek ve sürünün farklılaşmasını artırmak gibi modifikasyonlar uygulanmıştır.

Parçacıkların aşağıda ifade edilen denklem (5) ile başlangıç konumları yani ilk çözüm uzayı bulunmaktadır.

$$X_{i,d} = X_{min,d} + r_{i,d} \times (X_{max,d} - X_{min,d}) \quad (5)$$

Denklem (5) $X_{i,d}$, i tane parçacığın d -boyutlu uzayda başlangıç değerlerini, $X_{min,d}$ ve $X_{max,d}$ alt ve üst sınırları, $r_{i,d}$ (0,1) arasındaki rastgele sayıyı ifade etmektedir.

Her bir i . parçacığın d -boyutunda t zamandaki hızı aşağıda verilen Denklem (6) ile konumu ise Denklem (7) ile güncellenmektedir. Parçacığın hız vektörü sürünün önceki tecrübelerinden ve genel tecrübesinden faydalanmaktadır. Hız vektörü optimizasyon sürecini yönlendirmektedir.

$$V_{i,d}^{t+1} = (w^{t+1} \times V_{i,d}^t) + c_1 r_1 \times (Pbest_{i,d}^t - X_{i,d}^t) + c_2 r_2 \times (Gbest_{i,d}^t - X_{i,d}^t) \quad (6)$$

$$X_{i,d}^{t+1} = X_{i,d}^t + V_{i,d}^t \quad (7)$$

Denklem (6)'da yer alan c_1 ve c_2 öğrenme faktörleri olarak adlandırılmaktadır. Bir parçacığın kendi tecrübesini veya sürüdeki diğer parçacıkların tecrübesini ifade etmektedir. r_1 ve r_2 katsayıları her iterasyonda yenilenen (0,1) aralığında değer alan rastgele sayılardır. $Gbest$ sürüde bulunan en iyi parçacığın konum değerini belirtmektedir. Global en iyi konum olarak adlandırılmaktadır. $Pbest$, parçacığın belirlenen iterasyon sayısının sonunda elde edilen en iyi kişisel konum değerini belirtmektedir. Lokal en iyi konum olarak adlandırılmaktadır. Lokal en iyi konum Denklem (8) kullanılarak bulunmaktadır.

$$Pbest_{i,d}^{t+1} = \begin{cases} Pbest_{i,d}^{t+1} & , f(X_{i,d}^{t+1}) \geq f(Pbest_{i,d}^t) \\ X_{i,d}^{t+1} & , f(X_{i,d}^{t+1}) < f(Pbest_{i,d}^t) \end{cases} \quad (8)$$

Denklem (8)'de f amaç fonksiyonunu ifade etmektedir. Amaç fonksiyonu, optimizasyon probleminin optimuma ne kadar yakın olduğunu göstermektedir. PSO' da yapılan değişikliklerden biri de hız vektörünün sınırlanmasıdır. Hız vektörünün sınırlanması parçacık arama yeteneğini kontrol etmektedir. Hız vektörünün sınırlanması Denklem (9)'da gösterilmiştir.

$$V_{i,d}^{t+1} = \begin{cases} V_{i,d}^{t+1} & , V_{i,d}^{t+1} < V_{max} \\ V_{max} & , V_{i,d}^{t+1} \geq V_{max} \end{cases} \quad (9)$$

PSO' nun akış diyagramı Şekil 2' de gösterilmektedir.



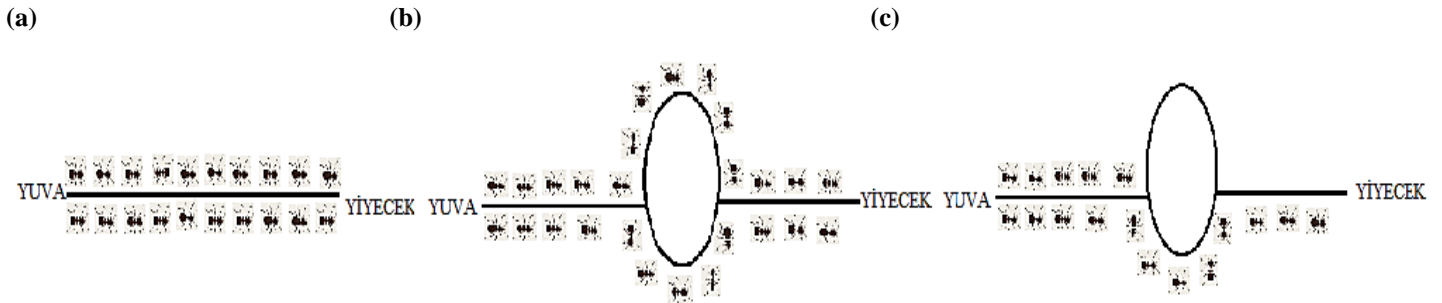
Şekil 2. PSO Akış Diyagramı

3.2. Karınca Koloni Algoritması (ACO)

Dorigo ve arkadaşları (1991) tarafından karıncaların yemek arama davranışından esinlenilerek oluşturulan siteme karınca sistemi, oluşturulan algoritmaya Karınca Koloni Algoritması (ACO) adı verilmiştir. ACO gerçek karıncaların yuvalarından yiyecek kaynağına doğru en kısa yolu bulmak için yaptıkları davranışlardan esinlenerek geliştirilmiştir. Karıncaların yuva ile yiyecek arasında en kısa yolu bulması ve diğer karıncalarla haberleşmesi için vücutları kimyasal bir madde salgılamaktadır. Salgıladıkları bu kimyasal maddeye feromon adı verilmektedir. Karıncalar geçtikleri yollarda belirli miktarda feromon maddesi bırakmaktadır. Feromon maddesinin miktarına göre gidecekleri yolu seçmektedirler.

Karıncalar feromon maddesinin daha yoğun olduğu yönü daha az olduğu yöne göre tercih etmektedir. Seçilen yolun kalitesi feromon yoğunluğu ile orantılıdır. Feromon izleri diğer karıncaların en kısa yolu bulmalarını sağlamaktadır. Karıncalar böylece optimum yönü seçebilmektedir. Feromon maddesi bir bilgiyi ifade etmekte ve karıncalar tarafından güncellenmektedir.

Karıncaların bir engelle karşılaştıklarında en kısa yolu nasıl buldukları Şekil 3' te gösterilmektedir.



Şekil 3.(a) Karıncaların Yiyeceğe Giderken İzlediği Yol; (a) Yuva İle Yiyecek Kaynağın Arasında Bir Engelle Konulması;

(c) Karıncaların En Kısa Yolu Bulması

Şekil 3(a)'da gösterildiği gibi karıncalar yiyecek kaynağına doğru gitmektedir. Gittikleri güzergah boyunca feromon maddesi bırakmaktadır. Feromon miktarı diğer karıncaların seçecekleri yolun belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 3 (b)'de gösterildiği gibi karıncalar yiyecek kaynağına giderken bir engelle karşılaştığında feromonları takip edememekte ve gidilebilecek yolları eşit olasılıkla seçmektedir. Karıncaların hızları aynı olduğu varsayılırsa kısa yoldan geçen karınca sayısı uzun yoldan geçen karınca sayısından fazla olacaktır. Kısa yoldan geçen karınca sayısı daha fazla olacağından bırakılan feromon miktarı da daha fazla olacaktır. Şekil 3 (c)'de gösterildiği gibi karıncalar yiyecek kaynağına doğru en kısa yolu kullanmaktadır. Kısa yoldan geçen karıncaların sayısı arttıkça feromon miktarı da artacaktır. Bırakılan feromon miktarı yolun uzunluğu ile ters orantılıdır.

3.3. Sürekli Zaman Karınca Koloni Algoritması (ACO_R)

ACO algoritması ilk ayrık optimizasyon probleminin çözümü için kullanılmıştır ve daha sonra sürekli optimizasyon problemlerinin çözümü için geliştirilmiştir. Socha ve Dorigo (2008) tarafından ACO algoritması genişletilerek sürekli zaman karınca kolonisi algoritması (ACO_R) oluşturulmuştur. ACO_R algoritması sağlık alanı, akıllı sistemler, haberleşme sistemleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Parametre değerlerinin uygun seçilmesi ile algoritmanın performansı önemli ölçüde artırılabilir. ACO_R

algoritması çözüm uzayından seçilen bir değişkenle Gaussian örnekleme kullanılarak yeni çözüm değişkeni oluşturulmasına bağlıdır (Socha ve Dorigo, 2008). ACO_R algoritmasında Gaussian örnekleme için değişken seçimi önemli bir konudur. Rulet Çarkı stratejisi uygulaması ile örnekleme için bir çözüm seçiminde aynı çözüm olmamasını ve daha geniş seçim sağlayarak ACO_R'nin performansının artırılmasını sağlamaktadır (Ojha, Abraham and Snasel, 2015).

Gaussian çekirdek fonksiyonu, Gaussian tabanlı birden fazla olasılık yoğunluk fonksiyonlarının ağırlıklı toplamından meydana gelmektedir. Gaussian çekirdek fonksiyonu Denklem (10)'da ifade edilmiştir.

$$G^i(x) = \sum_{l=1}^k w_l g_l^i(x) = \sum_{l=1}^k w_l \frac{1}{\sigma_l^i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_l^i)^2}{2\sigma_l^{i2}}} \tag{10}$$

Burada i ($i=1, \dots, n$) problemin boyutunu, w her bir Gaussian fonksiyonunun ağırlık vektörünü, μ^i ortalama vektörü ve σ_l^i standart sapma vektörünü ifade etmektedir.

Tablo 1. Çözüm Tablosu (Socha and Dorigo, 2015)

s_1	s_1^1	...	s_1^i	...	s_1^n	$f(s_1)$	w_1
s_2	s_2^1	...	s_2^i	...	s_2^n	$f(s_2)$	w_2

s_l	s_l^1	...	s_l^i	...	s_l^n	$f(s_l)$	w_l

s_k	s_k^1	...	s_k^i	...	s_k^n	$f(s_k)$	w_k
	G^1		G^i		G^n		

Tablo 1’de yer alan s_l aday çözümlerini ve $f(s_l)$ ise amaç fonksiyonunu göstermektedir. Aday çözümlerin amaç fonksiyonların değerlerine göre $f(s_1) \leq f(s_2) \leq f(s_3) \leq \dots \leq f(s_l) \leq \dots \leq f(s_k)$ sıralanmıştır. Aday çözümlerinin, amaç fonksiyonlarının aldıkları değerleriyle ilişkili bir ağırlık oranı bulunmaktadır. Ağırlık oranları $w_1 \geq w_2 \geq w_3 \geq \dots \geq w_l \geq \dots w_k$ şeklinde sıralanmaktadır. Gaussian çekirdek fonksiyonunu meydana getiren k adet Gaussian fonksiyonu bulunmaktadır.

μ^i , Gaussian çekirdek fonksiyonunun ortalama vektörünü ifade etmektedir ve Denklem (11) ile gösterilmiştir. (11)

$$\mu^i = \{\mu_1^i, \dots, \dots, \mu_k^i\} = \{s_1^i, \dots, \dots, s_k^i\}$$

Ağırlık vektörü w denklem (12) ile hesaplanmaktadır ve Gaussian fonksiyonun bir değeridir. Elde edilen çözümler değerlendirilerek amaç fonksiyonunun aldığı değerlere göre sıralanmaktadır.

$$w_l = \frac{1}{q_k \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(l-1)^2}{2q^2 k^2}} \tag{12}$$

Burada q_k standart sapmayı belirtmektedir ve l argümanlı, 1.0 ortalamalıdır. Algoritmanın parametrelerinden biri olan q_k 'nin değeri küçük seçilirse en iyi çözümler elde edilebilmektedir.

Aşağıdaki Denklem (13)’te Gaussian fonksiyonların seçilebilme olasılığı formülü verilmiştir.

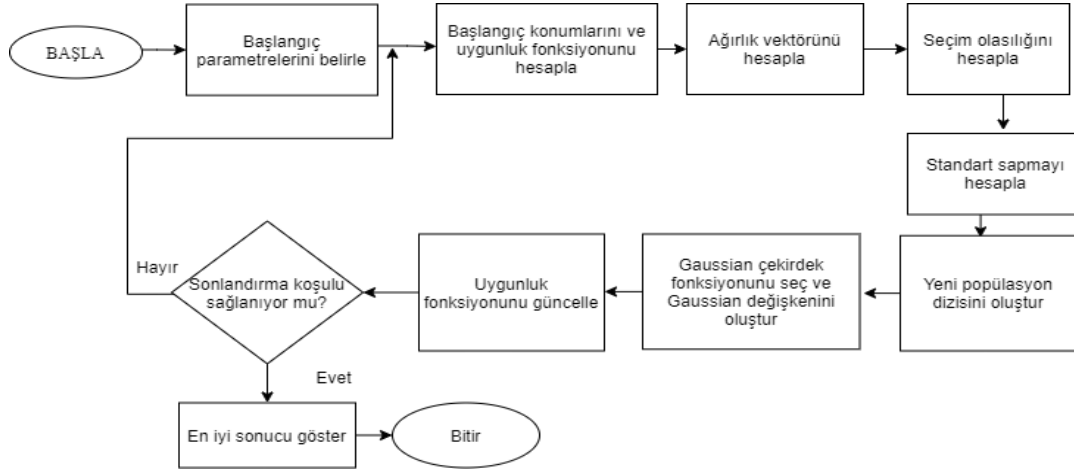
$$P_l = \frac{w_l}{\sum_{r=1}^k w_r} \tag{13}$$

Seçilebilme olasılığı hesaplandıktan sonra seçilen çözümün parametreleri Denklem (14) ile güncellenmektedir.

$$\sigma_l^i = \xi \sum_{e=1}^k \frac{|s_e^i - s_l^i|}{k-1} \tag{14}$$

Seçilen çözüm ile çözüm tablosunda bulunan diğer çözümler arasındaki ortalama mesafe Denklem (14)’te ifade edilen standart sapma σ_l^i ile hesaplanmaktadır. ξ parametresinin karınca koloni algoritmasında yer alan buharlaşma oranı ile aynı öneme sahiptir. Algoritmanın yakınsama hızı, ξ parametresinin değeri yükseldikçe azalmaktadır.

Sürekli zaman karınca koloni algoritmasının akış diyagramı Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. ACO_R Akış Diyagramı

3.4. Girdap Arama Algoritması (VSO)

Doğan ve Ölmez (2015) tarafından VSO önerilmiştir. VSO sürekli optimizasyon problemlerinin çözümü için kullanılan meta-sezgisel bir algoritmadır. Girdap modelinden esinlendiği için algoritmaya Girdap Arama Algoritması adı verilmiştir. VSO diğer optimizasyon algoritmalarına göre oldukça basittir ve tek çözüme dayalıdır.

İki boyutlu bir optimizasyon probleminin girdap modeli iç içe geçmiş birkaç daireden oluşmaktadır. Dairelerin yarıçapları azaltılarak oluşturulmaktadır. VSO'nun başlangıç aşamasında oluşturulan, girdabın en büyük çemberinin merkezi, Denklem (15) ile hesaplanmakta ve arama uzayının ortasında yer almaktadır. Başlangıç merkezi μ_0 denklem (15) ile bulunmaktadır.

$$\mu_0 = \frac{\text{üstlimit} + \text{altlimit}}{2} \quad (15)$$

Burada alt limit ve üst limit d boyutlu uzayda (karar değişkenlerinin sayısı) problemlerin sınırlarını ifade etmektedir. VSO başlangıç yarıçapı σ_0 denklem (16) ile bulunmaktadır.

$$\sigma_0 = \frac{\max(\text{üstlimit}) - \min(\text{altlimit})}{2} \quad (16)$$

a şekil parametresi olarak tanımlanmaktadır. Her iterasyonda Denklem (17) kullanılarak şekil parametresi hesaplanmaktadır.

$$a_t = a_0 - \frac{t}{\text{MaxItr}} \quad (17)$$

$a_0 = 1$ alınarak ilk iterasyonda arama alanının tam kapsamı sağlanmaktadır. Denklemdeki t iterasyon indeksini ve MaxItr ise maksimum iterasyon sayısını temsil etmektedir.

Yarıçapın değerini her iterasyonda azaltmak için ters tamamlanmamış gama fonksiyonu kullanılmaktadır. Çemberin yarıçapının değeri Denklem (18) ile hesaplanmaktadır.

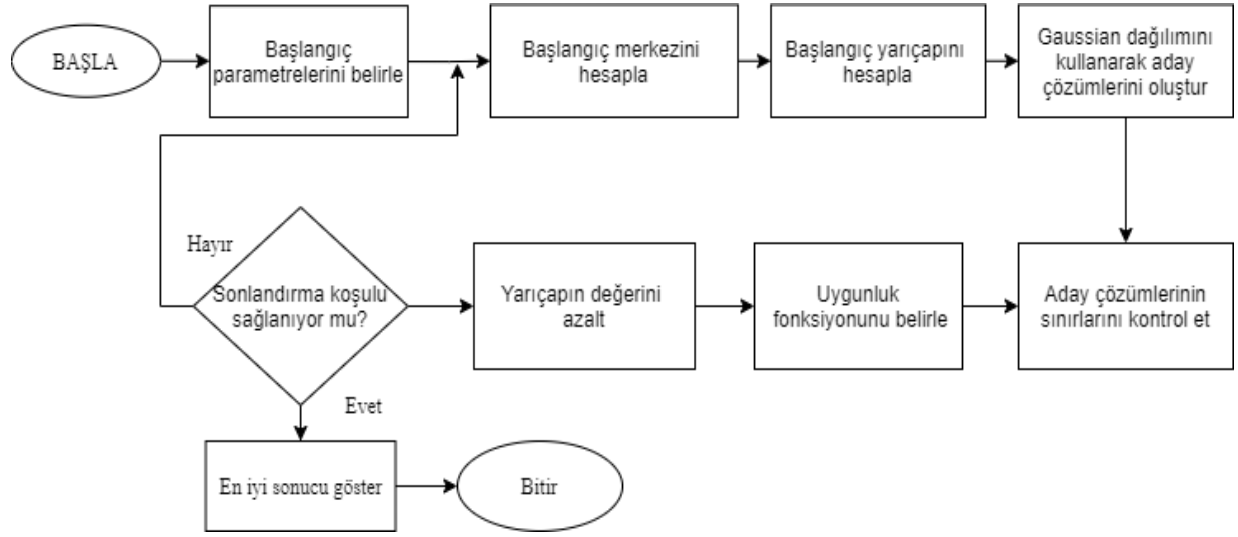
$$r_t = \sigma_0 \times (1/x) \times \Gamma(x, a_t) \quad (18)$$

Burada x değeri rastgele bir değer almakta ancak daha iyi performans elde etmek için 0.1 değeri alınmaktadır. Γ ters gamma fonksiyonunu ifade etmekte ve Matlab programında Γ yerine gammaincinv fonksiyonu kullanılmaktadır. VSO aday çözümler Gaussian dağılımı kullanılarak hesaplanmaktadır. Seçim yapılmadan önce n adet aday çözümler, arama sınırları içinde yer almalıdır. Sınırları aşan aday çözümler Denklem (19) kullanılarak sınırlara kaydırılmaktadır.

$$C(s)_k^i = \begin{cases} \text{rand.}(\text{üstlimit}^i - \text{altlimit}^i) + \text{altlimit}^i & , C(s)_k^i < \text{altlimit}^i \\ C(s)_k^i & , \text{altlimit}^i \leq C(s)_k^i \leq \text{üstlimit}^i \\ \text{rand.}(\text{üstlimit}^i - \text{altlimit}^i) + \text{altlimit}^i & , C(s)_k^i > \text{üstlimit}^i \end{cases} \quad (19)$$

$C(s)_k^i$, k. komşu çözümün i. boyutunu temsil etmektedir. rand uniform dağıtılmış rastgele bir sayıdır.

Girdap arama algoritmasının akış diyagramı Şekil 5' te gösterilmektedir.



Şekil 5. VSO Akış Diyagramı

4. Simülasyonlar

KSA'larda hedef sensörlerin konumlarını belirlemek için kullanılan optimizasyon algoritmalarının simülasyon sonuçları Şekil 6, 7 ve 8' te gösterilmektedir.

4.1. Parametreler ve Değerleri

PSO, ACO_R ve VSO algoritmalarında kullanılan parametre değerleri Tablo 2,3 ve 4' te gösterilmektedir.

Tablo 2. PSO Algoritması Parametreleri

PARAMETRELER	DEĞERLERİ
Problemin Boyutu	2
Populasyon Sayısı	20
İterasyon Sayısı	100
Ağırlık Katsayısı (w)	1
Ağırlık Katsayısı Sönümlenme Oranı (wdamp)	0.99
Bilişsel Öğrenme Faktörü (c_1)	1.5
Sosyal Öğrenme Faktörü (c_2)	2.0
Alt Limit	0
Üst Limit	100

Tablo 3. ACO_R Algoritması Parametreleri

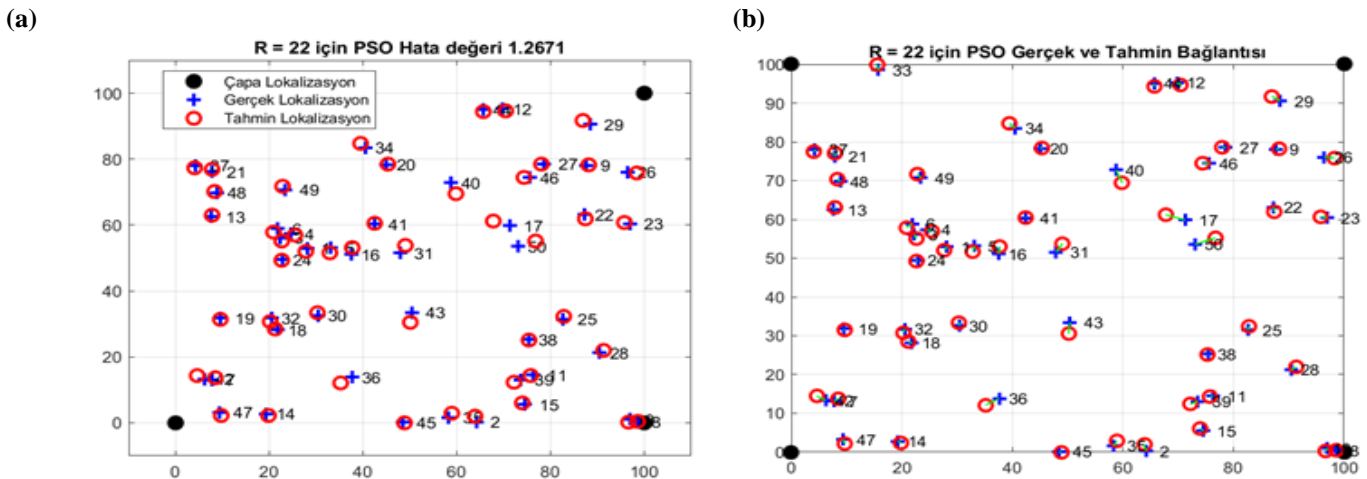
PARAMETRELER	DEĞERLERİ
Problemin Boyutu	2
Populasyon Sayısı	20
İterasyon Sayısı	100
Alt Limit	0
Üst Limit	100
Standart Sapma (q)	0.5
Sapma-Mesafe Oranı (ξ)	1

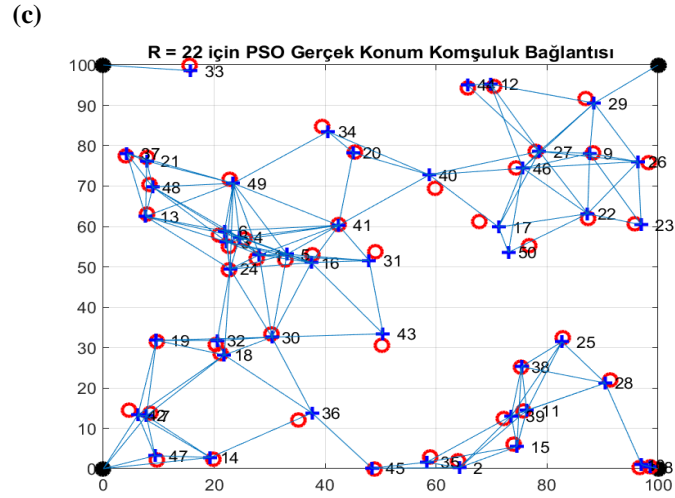
Tablo 4. VSO Algoritması Parametreleri

PARAMETRELER	DEĞERLERİ
Problemin Boyutu	2
Populasyon Sayısı	20
İterasyon Sayısı	100
Alt Limit	0
Üst Limit	100
x	0.1
Şekil parametresi (a_0)	1

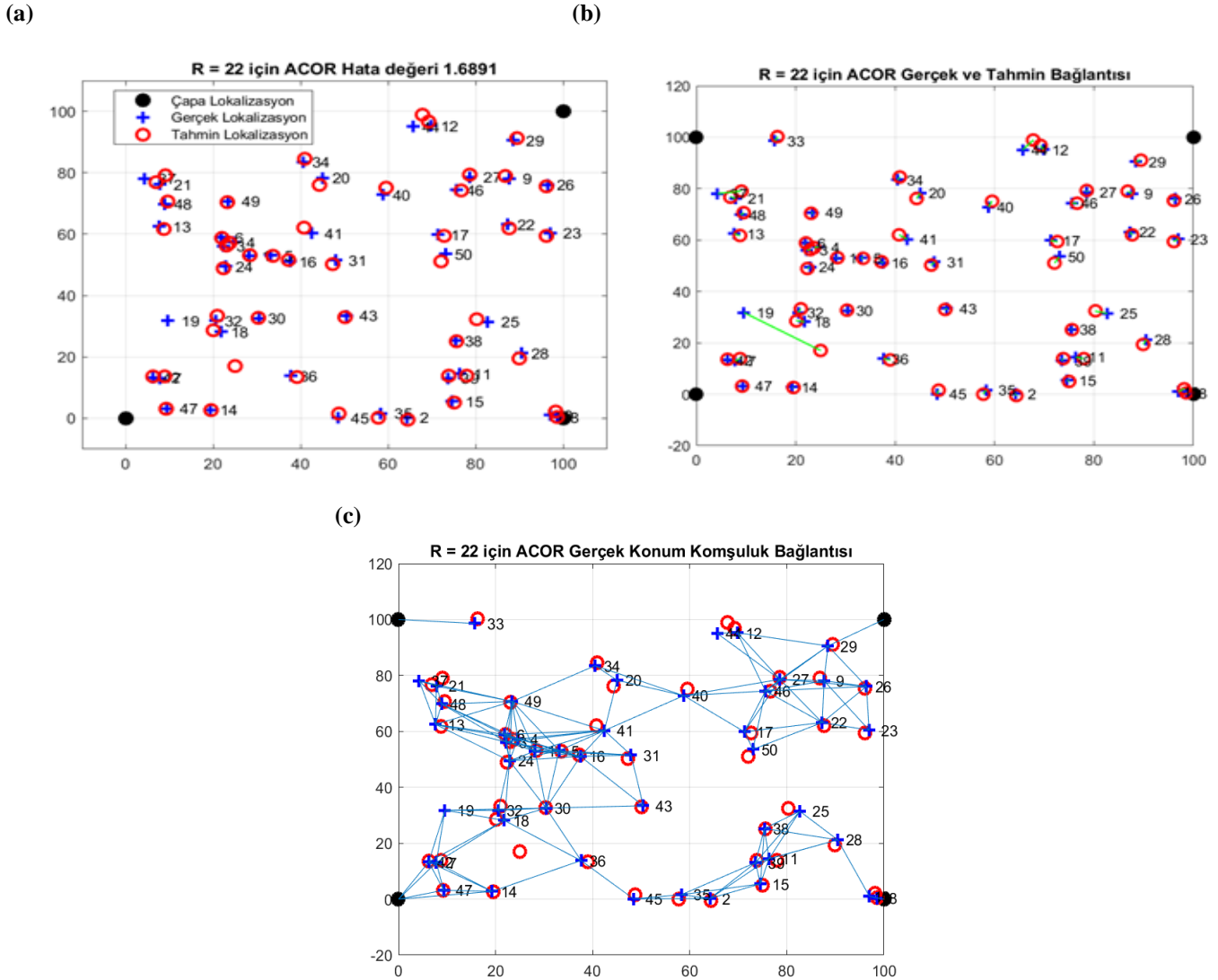
4.2. Bulgular

Matlab programında 100x100'lük bir alanda 4 adet referans düğüm (çapa) köşelere yerleştirilmiştir. Rastgele dağıtılan 50 adet düğümün konum tespiti için PSO, VSO ve sürekli dağılım için ACO_R kullanılmıştır. Her bir sensörün kapsama alanı yarıçapı R=22 birim alınarak PSO, VSO ve ACO_R algoritmaları için aynı düğüm koordinatları üzerinde çalıştırılmıştır. Tüm algoritmalar için simülasyon 1'e ait şekiller Şekil 6, 7, 8 ve 9'da gösterilmiştir. Şekil 6 ve 7'de PSO algoritmasına ait simülasyon sonuçları gösterilmiştir. Şekil 6 (a)'da yer alan mavi renkli + işaretler gerçek konumu, kırmızı renkli yuvarlak işaretler PSO algoritması ile elde edilen tahmini konumu ve köşelerde yer alan siyah renkli yuvarlak işaretler GPS ile yeri tespit edilen referans düğümü göstermektedir. Şekil 6 (b)'de gerçek konum ile tahmini konum arasındaki mesafe yeşil renkli çizgilerle gösterilmiştir. Şekil 7(c)'de ise R=22 için gerçek konum komşuluk bağlantısı gösterilmiştir. Şekil 8 (a), 8 (b) ve 8 (c)'de R=22 için VSO algoritmasının ve Şekil 9 (a), 9 (b) ve 9 (c)'de R=22 için ACO_R algoritması ile elde edilen simülasyon sonuçları gösterilmiştir. Simülasyonlarda R=22'de PSO, VSO ve ACO_R algoritmaları 100'er kere tekrarlanmıştır. Tablo 5'te tüm algoritmaların simülasyon sonuçları 20 defa tekrarlanarak elde edilen hata oranları ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir. Ayrıca Tablo 5'te 20 simülasyonun ortalama değeri verilmiştir. Tüm algoritmalar için simülasyon sonuçları 100 defa tekrarlanarak ortalama hata değerleri Tablo 6'da sunulmuştur.

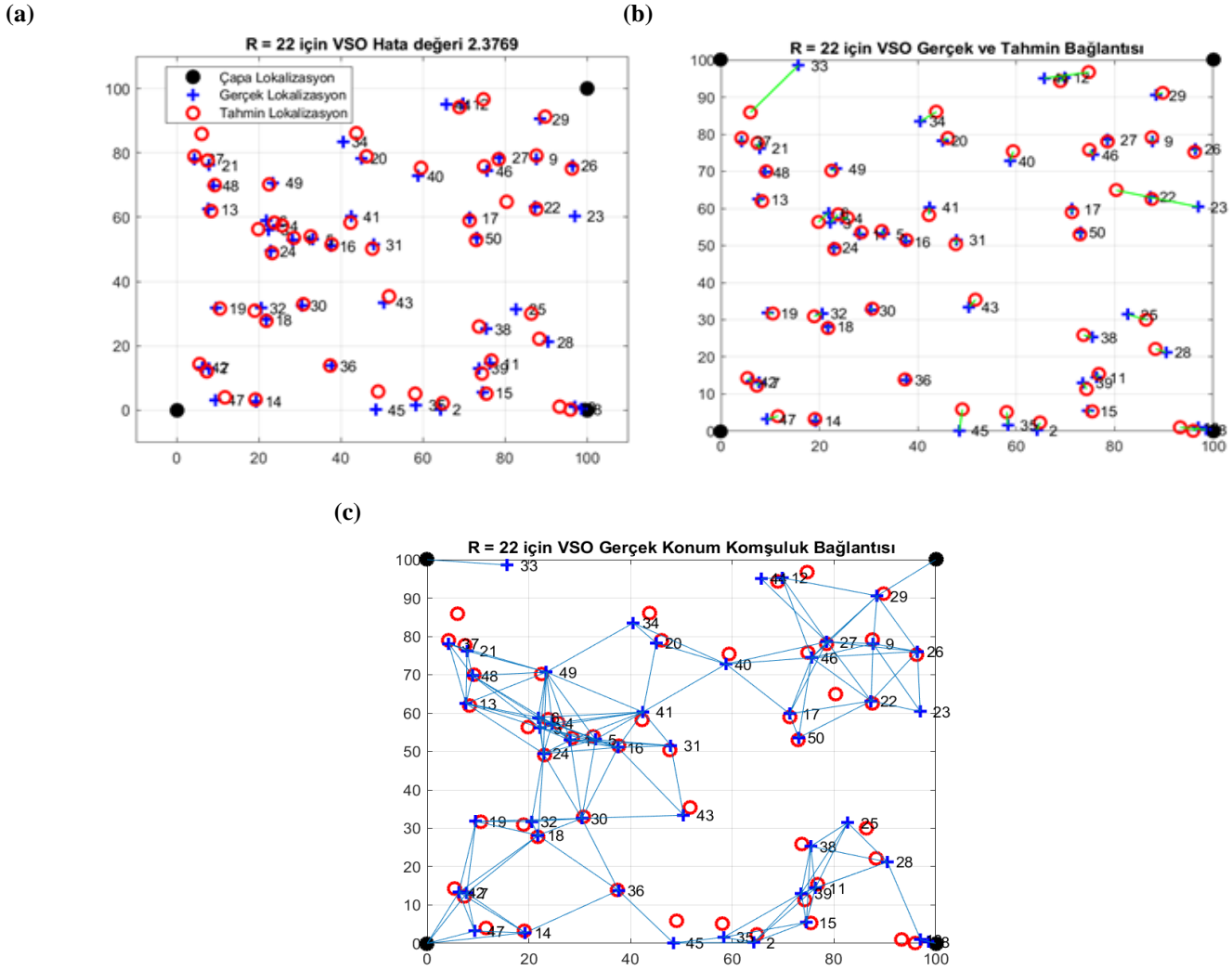
**Şekil 6.** (a) PSO için Hata Değeri; (b) PSO için Gerçek ve Tahmin Bağlantısı



Şekil 7. (c) PSO için Gerçek Konum Komşuluk Bağlantısı



Şekil 8. (a) ACO_R için Hata Değeri; (b) ACO_R için Gerçek ve Tahmin Bağlantısı; (c) ACO_R için Gerçek Konum Komşuluk Bağlantısı



Şekil 9. (a) VSO için Hata Değeri; (b) VSO için Gerçek ve Tahmin Bağlantısı; (c) VSO için Gerçek Konum Komşuluk Bağlantısı

Tablo 5. Algoritmaların Hata Değerleri
İLETİM MESAFESİ (R=22)

	PSO	ACOR	VSO
Simülasyon 1	1.2671	1.6891	2.3769
Simülasyon 2	1.2214	2.0144	2.4070
Simülasyon 3	1.6462	1.5842	2.0642
Simülasyon 4	1.5783	2.0168	1.9336
Simülasyon 5	1.5061	2.0749	2.7797
Simülasyon 6	1.5547	1.9924	1.7697
Simülasyon 7	1.9272	1.7094	1.4003
Simülasyon 8	1.7964	2.0608	2.1830
Simülasyon 9	1.8548	1.9086	2.8971
Simülasyon 10	1.5013	1.3692	2.6733
Simülasyon 11	1.5216	1.7603	2.6872
Simülasyon 12	2.0558	2.1988	1.9177
Simülasyon 13	1.8275	2.1356	1.9222
Simülasyon 14	2.0547	1.9954	2.0141

Tablo 5 (Devam). Algoritmaların Hata Değerleri

İLETİM MESAFESİ (R=22)			
	PSO	ACO _R	VSO
Simülasyon 15	1.6993	1.9291	2.1023
Simülasyon 16	2.2072	2.2982	1.5084
Simülasyon 17	1.7768	2.2577	1.7496
Simülasyon 18	2.0178	1.9880	2.1831
Simülasyon 19	1.9201	1.6359	2.5364
Simülasyon 20	1.4411	2.2639	1.9704

Tablo 6. 100 adet Simülasyon için Algoritmaların Ortalama Hata Değerleri

İletim Mesafesi (R)	R=22
PSO	1.703336
ACO _R	1.875454
VSO	2.156924

5. Tartışma ve Sonuç

Çalışmada kablosuz sensör ağlarının hedef sensörlerin gerçek konumlarının belirlenmesinde PSO, ACO_R ve VSO algoritmaları kullanılmıştır. Algoritmalarda popülasyon boyutu 50 ve parametre değerleri birbirlerine yakın seçilmiştir. Aynı düğüm noktaları kullanılarak algoritmalar karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler grafiksel ve sayısal olarak şekil ve tablolar halinde sunulmuştur. Tablo 5'te PSO, ACO_R ve VSO algoritmalarının ortalama hata değeri simülasyonlar 20 kere tekrarlanarak hesaplanmıştır. PSO, ACO_R ve VSO göre daha az hata oranı elde edilmiştir. Tablo 6'da 100 adet simülasyon için algoritmaların ortalama hata değerlerine bakıldığında PSO'da hata oranının daha az olduğu tespit edilmiştir.

Literatürde birçok optimizasyon yöntemi kullanılarak en az hata ile hedef sensörlerin gerçek konumlarını tespit eden birden fazla çalışma bulunmaktadır. Bu makalede PSO algoritması kullanılarak en az hata tespit edilmiştir.

Referanslar

- Aspnes, J., Eren, T. and Goldenberg, D. (2006). "A Theory of Network Localization. IEEE Transactions on Mobile Computing", 5(12), pp. 1663–1678.
- Bacanın, N., Tuba, E., Zivkovic, M., Strumberger, I. and Tuba, M. (2019). "Whale Optimization Algorithm with Exploratory Move for Wireless Sensor Networks Localization", International Conference on Hybrid Intelligent Systems, pp. 328-338.
- Bekçibaşı, U., Tenruh, M. (2012). Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Konum Saptama Teknikleri ve Mesafe Bağımlı Tekniklerde Dördüncü Çapa Yaklaşımı, Akademik Bilişim'12 - XIV. Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri, 2012.
- Cui, H., Liang, Y., Zhou, C. and Cao, N. (2018) "Localization of Large-Scale Wireless Sensor Networks Using Niching Particle Swarm Optimization and Reliable Anchor Selection", Hindawi Wireless Communications and Mobile Computing, pp.1-18, <https://doi.org/10.1155/2018/2473875>.
- Dalkılıç, G. ve Türkmen, F. (2002) " Karınca kolonisi optimizasyonu", YPBS2002–Yüksek Performanslı Bilişim Sempozyumu, Kocaeli, Ekim.
- Dariane, A.B. and Moradi, A.M. (2009) "Reservoir Operating by Ant Colony Optimization for Continuous Domains (ACO_R) Case Study: Dez Reservoir", International Journal of Mathematical, Physical and Engineering Sciences", 3(2), pp.125-129.
- Doğan, B. ve Korürek, M. (2010) "EKG Vurularının Sürekli Zaman Karınca Koloni Optimizasyonu Yardımıyla Sınıflandırılması ECG Beat Classification Using Ant Colony Optimization for Continuous Domains", National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering, Bursa, pp. 497-501.
- Doğan B. and Ölmez, T. (2015) "A new metaheuristic for numerical function optimization: Vortex Search algorithm, Information Sciences, 293, 125-145.

- Doğan, R. (2018) “KABLOSUZ SENSÖR AĞLARI İÇİN RSSI DEĞERİ İLE YAPAY SİNİR AĞI YAKLAŞIMLI KONUM BULMA”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Doğru, A.S., Temel, B. and Eren, T. (2019) “Kablosuz Sensör Ağlarında Konum Belirlemede Parçacık Sürü Optimizasyonu ve Yarasa Algoritması Yöntemlerinin Karşılaştırılması”, Uluslararası Mühendislik Araştırma Ve Geliştirme Dergisi, 11(3), 793-801.
- Dorigo M, Colorni A, Maniezzo V (1991) “Positive feedback as a search strategy”, Technical Report 91-016, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Milan, Italy.
- Eberhart, R. and Kennedy, J. (1995) “A New Optimizer Using Particle Swarm Theory”, Sixth International Symposium On Micro Machine And Human Science, pp. 39-43.
- Eren, T. (2016). Graph Invariants for Unique Localizability in Cooperative Localization of Wireless Sensor Networks: Rigidity Index and Redundancy Index, Ad Hoc Networks, 44, pp. 32-45, 2016.
- Eren, T., (2017) “The effects of random geometric graph structure and clustering on localizability of sensor networks”, International Journal of Distributed Sensor Networks, 13(12), 1-15.
- Eren, T., (2019) “Conditions for Unique Localizability in Cooperative Localization of Wireless ad hoc and Sensor Networks”, Cooperative Localization and Navigation: Theory, Research and Practice, 31-48, Gao, C.(Ed.), Zhao, G. (Ed.), Fourati, H. (Ed.). Boca Raton: CRC Press (2019).
- Eren, T. Goldenberg, D. and Whiteley, W. (2004) “Rigidity, Computation and Randomization in Network Localization”, In Proceedings of the 2004 International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2004), Hong Kong, pp. 2673–2684.
- Gangal, V. (2015) “ Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Karınca Koloni Algoritmali Rotalama ile Enerji Etkin Rotalamanın İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Goyal, S. and Patterh, M.S. (2015), “Flower Pollination Algorithm based Localization of Wireless Sensor Network”, 2nd International Conference on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences (RAECS), doi:[10.1109/RAECS.2015.7453299](https://doi.org/10.1109/RAECS.2015.7453299).
- Güngüneş, R., Ateş, V., Lüy, M. ve Eke, İ. (2019) “Doğrusal Olmayan Yüklere Sürekli Zaman Karınca Kolonisi Algoritması İle Optimal Değerli Kondansatör Seçimi ve Güç Kontrolü”, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 11(3), 780-792, doi:[10.291374/umagd.636390](https://doi.org/10.291374/umagd.636390).
- Kannan, A.A., Mao, G. And Vucetic, B. (2006) “Simulated annealing based localization in wireless sensor network”, Journal of Computers, doi:[10.4304/jcp.1.2.15-22](https://doi.org/10.4304/jcp.1.2.15-22).
- Karaboğa, D. (2004). Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları. Nobel Yayın Dağıtım, 2004
- Kennedy, J. And Eberhart, R. (1995) “Particle Swarm Optimization”, pp.1942-1948.
- Keskintürk, T. ve söyler, H. (2006) "GLOBAL KARINCA KOLONİSİ OPTİMİZASYONU", Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21(4).
- Kızılkaplan, E., Eren, T. and Yalçınkaya, F. (2020) “Kablosuz Sensör Ağlarında Konum Belirlemede Sezgisel Algoritmaların Kuantum Davranışları ile Karşılaştırılması”, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 12(2), 587-602, doi:[10.29137/umagd.746589](https://doi.org/10.29137/umagd.746589).
- Kumar, A., Khosla, A., Saini, J.S. ve Singh, S. (2012) “Meta-Heuristic Range Based Node Localization Algorithm for Wireless Sensor Networks”, International Conference on Localization and GNSS, doi:[10.1109/ICL-GNSS.2012.6253135](https://doi.org/10.1109/ICL-GNSS.2012.6253135).
- Ojha, V. K., Abraham, A. ve Snasel, V. (2017) "ACO for Continuous Function Optimization: A Performance Analysis", 14th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, (February 2015), pp. 145–150. doi:[10.1109/ISDA.2014.7066253](https://doi.org/10.1109/ISDA.2014.7066253).
- Özsağlam, M.Y. and Çunkaş, M. (2008) “Optimizasyon Problemlerinin Çözümü için Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması”, Politeknik Dergisi, 11(4), pp.299-305.

- Öztürk, C. (2016) “Yapay Arı Koloni Algoritması ile Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Lokalizasyon”, T.C. ERCİYES ÜNİVERSİTESİ BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ KOORDİNASYON BİRİMİ, Proje No:FBA-12-4029.
- Poli, R., Kennedy, J. And Blackwell, T. (2007) “Particle swarm optimization”, *Swarm Intell*, pp. 33-57, [doi:10.1007/s11721-007-0002-0](https://doi.org/10.1007/s11721-007-0002-0).
- Ramson, S.R.J. and Moni, D.J. (2017) “Applications of Wireless Sensor Networks-A Survey”, *Proceedings of IEEE International Conference on Innovations in Electrical, Electronics, Instrumentation and Media Technology*, pp.325-329, [doi:10.1109/ICIEEIMT.2017.8116858](https://doi.org/10.1109/ICIEEIMT.2017.8116858)
- Rashid, H. and Turuk, A.K. (2013) “Localization of Wireless Sensor Networks Using a Single Anchor Node”, *Wireless Personal Communications*, 72(2), pp.975-986, [doi:10.1007/s11277-013-1050-y](https://doi.org/10.1007/s11277-013-1050-y).
- Reyes-Sierra, M. and Coello Coello, C.A. (2006) “Multi-Objective Particle Swarm Optimizers: A Survey of the State-of-the-Art”, *International Journal of Computational Intelligence Research*, 2(3), pp.287-308, [doi:10.5019/j.ijcir.2006.68](https://doi.org/10.5019/j.ijcir.2006.68)
- Sağ, T. (2020) “Çok Merkezli Girdap Arama Algoritması”, *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 8, 1279-1294, [doi:10.29130/dubited.644881](https://doi.org/10.29130/dubited.644881).
- Shrivastava, A. and Bharti, P. (20115) “Localization Techniques for Wireless Sensor Networks”, *International Journal of Computer Applications*, 16(12), pp.13-18.
- Singh, S.P. and Sharma, S.C. (2015) “Range Free Localization Techniques in Wireless Sensor Networks: A Review”, 3rd *International Conference on Recent Trends in Computing*, *Procedia Computer Science*, pp.7-16, [doi:10.1016/j.procs.2015.07.357](https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.357)
- Socha, K. and Blum, C. (2007) “An ant colony optimization algorithm for continuous optimization: application to feed-forward neural network training”, *Neural Comput& Applic*, 16, pp. 235-247, [doi:10.1007/s00521-007-0084-z](https://doi.org/10.1007/s00521-007-0084-z).
- Socha, K. and Dorigo, M. (2008) “Ant colony optimization for continuous domains”, *European Journal of Operational Research*, 185, pp. 1155-1173, [doi:10.1016/j.ejor.2006.06.046](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.06.046).
- Strumberg, I., Beko, M., Tuba, M., Minovic, M. and Bacanin, N. (2018) “Elephant herding optimization algorithm for wireless sensor network localization problem”, *Technological Innovation for Resilient Systems*, pp.175-184, [doi:10.1007/978-3-319-785745_17](https://doi.org/10.1007/978-3-319-785745_17).
- Wang, C., Chen, J., Sun, Y. and Shen, X.S. (2009) “Wireless Sensor Networks Localization With Isomap”, *IEEE International Conference On Communications*, pp. 28-32, [doi:10.1109/ICC.2009.5199576](https://doi.org/10.1109/ICC.2009.5199576).
- Wilson, R.J. (1995) “Introduction to Graph Theory”, Fourth edition.
- Xiao, J. and Li, L.P. (2011) “A hybrid ant colony optimization for continuous domains”, *Expert Systems with Applications*, 38, 11072-11077.
- Yıldırım, G. (2012) “Kablosuz Sensör Ağı İle Konum Belirleme Ve İzleme, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.



Kullanıcı Perspektifli Çok Kriterli Karar Verme ile Elektrikli Araçlarda Batarya Seçimi

Multicriteria Decision Making Based on User Perspective for Battery Selection in The Electric Vehicles

Mustafa Hamurcu¹, Emine Çakır¹, Tamer Eren^{*1}

¹ Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 71450 Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 21/04/2021

Kabul / Accepted: 10/06/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 18/06/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Geleneksel araçlar, iyi performans ve uzun menzil sağlamak için petrol ve türevi yakıtlardan yararlanmaktadır. Fakat bu araçlar, çevre kirliliğine sebep olması ve tükenmek üzere olan fosil yakıtlar nedeniyle dezavantajlara sahiptirler. Bu sebeplerden dolayı, alternatif yakıtlı araç teknolojileri gelişmektedir. Günümüzde, geliştirilen batarya teknolojileri ile çevre dostu olan elektrikli araçlar yaygınlaşmaktadır. Ancak batarya teknolojileri, batarya ömrü, deşarj oranı, nominal gerilim, spesifik enerji, dayanıklılık gibi özellikleri ile birbirinden farklılaşmakta ve çeşitlenmektedir. Bu çalışmada, enerji kaynağı olarak seçilecek olan batarya tipinin seçimi, çok kriterli karar verme yöntemleri olan analitik hiyerarşi prosesi (AHP) ve MOORA yöntemleri kullanılarak kullanıcı perspektifi bakımından yapılmıştır. Elektrikli araçların ve kullanılan çeşitli bataryaların tanıtıldığı çalışmada, kullanılan yöntemlerin sonuçları karşılaştırılmış ve en iyi alternatif olarak Li-ion batarya türü seçilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Batarya seçimi, elektrikli araçlar, AHP, MOORA”

Abstract

Traditional vehicles benefit from petroleum and derivative fuels to ensure good performance and long range. At the same time, they have disadvantages due to environmental pollution and fossil fuels that are about to run out. For these reasons, alternative fuel vehicle technologies are developing. Nowadays, electric vehicles are becoming more environmentally friendly with the developed battery Technologies. However, battery technologies are differentiated and diversified by their characteristics such as battery life, discharge rate, nominal voltage, specific energy and durability. In this study, the selection of the type of battery to be selected as the energy source is made in terms of user perspective by using analytical hierarchy process (AHP) and MOORA methods which are multicriteria decision making methods. Electric vehicles and various batteries are introduced in the study, the results of the methods used are compared and Li-ion battery type has been selected as the best alternative technology.

Key Words

“Battery selection, electric vehicles, AHP, MOORA”

1. Giriş

Günümüzde elektrikli araçların (EA) önemi günden güne artmaktadır. Artan araç sayısı ve buna bağlı olarak fosil kaynaklı yakıtların gittikçe tükeniyor olması ve atmosferdeki karbondioksit gazı miktarının hızla artması sonucu ortaya çıkan çeşitli çevresel sorunlara neden olmaktadır. Tüm bu nedenler alternatif yakıt arayışına girilmesine sebep olmaktadır. Bu bakımdan önemli teknolojik gelişmelerden biri olan elektrikli araçlar bir çözüm olarak görülmektedir.

Batarya fiyatlarının düşmesi ve yeni batarya teknolojisi otomobil üreticilerinin daha uzun menzilli daha ucuz modeller üretmesini sağladığından, günümüzde giderek daha fazla kullanıcı elektrikli araçları tercih etmektedir (TEHAD, 2021). Yakın gelecekte, hareketliliğin büyümesi ve sürücüsüz araçların ortaya çıkışı, elektrikli araçları güçlü bir şekilde tamamlayarak, elektrikli araç pazarına giriş sürecini daha da hızlandırmaktadır. Buna ek olarak, yönetimler, çeşitli çevresel ve sosyo-ekonomik faydayı göz önünde bulundurarak uzun süredir EA satın alımlarını teşvik etmektedir. Yaygınlaşan elektrikli araçların benimsenmesine geçiş hızlanmaktadır, ancak yine de (i) uzun şarj süreleri ve (ii) toplu EA şarjı nedeniyle şebeke aşırı yüklemesi etrafında endişeler devam etmektedir (Sun vd., 2019).

Son yüzyılın başından bu yana, küresel enerji kıtlığı ve çevre kirliliği sorunu giderek daha ciddi hale gelmiştir. Bu duruma etki eden faktörlerden birisi de ulaşım için kullanılan araçlardır. EA'lar, temiz ve kirlilik içermeyen bir yeni ulaşım türü olarak, tüm toplumun dikkatini çeken enerji tasarrufu, çevre koruma ve sürdürülebilir kalkınma gereksinimlerini aynı anda karşılayabilen araçlar olarak ortaya çıkmaktadır. EA'lar için dezavantaj olarak görülen yetersiz menzil ve uzun şarj süreleri üzerinde durularak batarya teknolojilerinde önemli ölçüde gelişmeler kaydedilmiştir. Batarya ile çalışan elektrikli araçlar, kademeli olarak içten yanmalı motor tabanlı araçların yerini almaktadır. Ancak, daha iyi performans gösteren bataryaların geliştirilmesi hala devam ederken, bu süreç çok yavaş bir hızda gerçekleşmektedir. Hızlı şarj, uzun menzilli sürüş, uzun batarya ömrü ve düşük maliyet, gelişen batarya teknolojisinde karşılanması gereken katı gereksinimlerdir.

Tarihsel geçmişi eski olan elektrikli araçlar, şarj sürelerinin uzun olması ve performans seviyelerinin düşük olmasından dolayı gelişme gösterememişlerdir. Fakat alternatif enerji kaynaklarının bir çözüm olarak değerlendirildiği günümüzde elektrikli araçların tercih edilmesi ve elektrik enerjisinin kimyasal olarak depolanmasını sağlayan bataryalar büyük önem teşkil etmektedir. Batarya sistemi elektrikli araçlarda önemli bir etkidir. Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasının yanı sıra, hızlı şarj edilebilmesi ve uzun ömürlü olması istenilen özelliklerden bazılarıdır. Ayrıca, elektrikli araçların menzilleri batarya kapasiteleri ile doğru orantılıdır.

Günümüzde popüler olan elektrikli araçların tarihi aslında 1800'lü yılların başına kadar dayanmaktadır. Stratingh tarafından 1835 yılında ilk elektrikli araç modeli oluşturulmuş ve ilk fren sistemi 1897 yılında bulunmuştur. Ayrıca fren sistemi elektrikli bir araca uygulanarak menzili artırılmıştır (Solera, 2001). Daha sonra maksimum 6,4 km/h hızla yol alabilen elektrikli lokomotif Davidson tarafından üretilmiştir. 1900'lü yıllara gelindiğinde Electroautomobile ve 1903 yılında hem elektrik hem de benzinle çalışan hibrit elektrikli araç modeli ortaya koymak için çalışılmış ve sonuçta 1916 yılında hibritli elektrik araç üretilmiştir (Huo vd., 2015). Devam eden yıllarda elektrikli araçlara olan ilgi azalırken motorlu (içten yanmalı) araçlara ise 1920-1960 yılları arasında ilgi artmıştır. Ayrıca 1935'li yıllarda EA'lar piyasada neredeyse hiç bulunmamıştır. 1990'dan itibaren batarya teknolojisinin geliştirilmeye çalışılmasıyla birlikte birçok firma EA geliştirmeye başlamıştır.

Elektrikli araçların birçok avantajı bulunmaktadır. Örneğin: Motorda yağ değişimine gerek yoktur ve frenleme esnasında kaybedilen enerjinin kullanılmasıyla tekrar bataryada depolanmasını sağlanmaktadır. Dolayısıyla bu araçların elektrikle bağlanarak şarj edilmesi gibi bir gereksinim azdır (Sayın ve Yüksel, 2011; Güner, 2013; Khaligh ve Zhihao, 2010). Ayrıca elektrikli araçlar içten yanmalı motorlara göre çok daha az parçadan oluşan teknik altyapı sayesinde çok daha geniş iç mekân sunmaktadır. Batarya ve bakımları diğer motorlu araçlara göre çok daha kolay ve düşük maliyetlidir. Daha hızlı, daha sessiz ve daha ferah olmasının yanı sıra düşük maliyetle cazip bir finansal çözüm oluşturması da tercih edilme sebeplerindedir. Elektrikli araçların kullanımındaki artış, yenilenemez enerji kaynakları ve yakıt maliyetlerini düşürmektedir (Von vd., 2015). Bu gibi avantajlardan dolayı elektrikli araçlara olan ilgi gittikçe artmaktadır. Beraberinde gelişmekte olan batarya teknolojileri de elektrikli araçların gelişiminde büyük paya sahiptir. (Frieske, 2013). Trafikte elektrikli araçların kullanmanın avantajları, tekerleklerle iletilen elektrik motorunun yüksek torku ve içten yanmalı motorlu araçlara göre daha yumuşak hızlanma (ve yavaşlama). Ayrıca elektrikli araçlar elektrik motorunu çalıştırırken gürültü yaymazlar ve kirlenici emisyonlar üretmezler. Bu bakış açısı, EA'ları kentsel alanlarda kullanılacak ideal araçlar haline getirmektedir. Ancak bu avantajların yanı sıra, EA'arın kullanmanın bazı dezavantajları vardır:

- Yüksek üretim maliyetleri.
- Küçültülmüş toplam boyut
- Sınırlı özerklik ve hız.
- Yüksek şarj süreleri ve özel şarj yerlerine ihtiyaç.
- Elektrik motoru gürültüsünün olmaması trafik kazalarına (işitme engelli kişiler, yayalar, bisikletliler vb.) neden olabilir.

Elektrikli araç üreticileri, yalnızca performans faktörlerini göz önünde bulundurarak bataryayı seçme eğilimindedirler; enerji yoğunluğu ve güç, ayrıca güvenlik, güvenilirlik (arızasız çalışma) ve maliyet gibi diğer önemli özellikleri de göz önünde bulundururlar. Ancak,

üreticilerin karar verme veya seçim için bir aracı yoksa en iyi bataryayı seçmek kolay bir iş değildir. Bu noktada çok kriterli karar verme (ÇKKV) araçları önemli rol oynamaktadır. ÇKKV, çok sayıda faktöre dayalı olarak çeşitli alternatifler arasından en iyisinin seçiminin sağlanması için karmaşık problemlerle ilgilenir. Karar vericiler optimal bir çözüm bulmak isteyeceklerdir ve bu sadece tek kriterlere dayalı karar verme durumları için elde edilebilir. Genel olarak, belirli durumlar için alınan kararlar çatışmalar içerir. Bazı endüstriyel durumlarda, zayıf veya çelişkili kararların sonuçları güvenli olmayan durumlara yol açacaktır. Dolayısı ile güvenli batarya teknolojisinin seçimi de EA'ların üretiminde kritik bir karar sürecidir.

Elektrikli araçlarda kullanılacak olan batarya seçiminde karar verme süreci, ÇKKV için uygun bir alandır çünkü batarya sistemleri çok sayıda faktör ve çeşitlilik içermektedir. Ayrıca gelişmekte olan ve ilgi gören elektrikli araçlar için dikkate alınması gereken önemli detaylardandır. Piyasada çok sayıda batarya çeşitlerinin bulunması ve hala istenilen düzeyde olmaması, karar verme süreci için çok karmaşıktır. Bu sebeple elektrikli araçlarda batarya seçimi, birden fazla amacı bir arada değerlendirerek karmaşık süreçleri daha anlaşılır bir biçimde çözümlenebilmek için tercih edilmektedir (Kerem, 2014).

Bu çalışmada alternatif yakıtlı ulaşım araçlarından elektrikli araçların batarya seçiminde ÇKKV yöntemlerinden AHP, MOORA ve bütünleşik AHP-MOORA seçim sürecini içermektedir. AHP yöntemi basit ve temel matematiksel hesaplamaları içermesi, daha anlaşılır olması, değerlendirme kriterlerinin önem seviyelerinin görülebilmesi nedenlerinden dolayı; MOORA yöntemi ise temel matematiksel hesaplamalar içermesi ve kısa sürece çözüm sunması nedenlerinden dolayı kullanılmıştır.

Çalışmanın ikinci kısmında elektrikli araçlar ve bataryalarıyla alakalı literatür taraması yapılmıştır. Üçüncü bölümde, elektrikli araçlar ve batarya teknolojilerinden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde ise ÇKKV yöntemlerinden olan AHP ve MOORA yöntemleri sırasıyla anlatılmıştır. Beşinci bölümde batarya seçimi uygulaması yapılmıştır. Son kısım olan altıncı bölümde, sonuç ve önerilere yer verilmiştir

2. Literatür Araştırması

Tüm Araçların neden olduğu hava kirliliği ve fosil yakıtların tükenmesi alternatif yakıtlı araçların gelişiminin hızlanmasında önemli iki etmendir ve gün geçtikçe fosil yakıtların çevre kirliliğine neden olmasından dolayı elektrikli araçlar alternatif bir seçenek haline gelmiştir (Xiong vd., 2018). Elektrikli araçlar sera gazının azaltılmasında önemli rol oynamaktadır (Bulach vd., 2018; San vd., 2011). Diğer araçlarla karşılaştırıldığında, elektrikli araçlar çevreye hiç atık gaz salımı gerçekleştiriyor. Bu sayede neredeyse yüzde 100 çevrecidir. Güneş ya da rüzgâr gibi enerji kaynaklarından elektrikli otomobil şarj ediliyorsa o zaman çevrecilik oranı maksimum seviyede gerçekleşmektedir.

Günümüzde elektrikli araçlar, otomotiv endüstrisinde önemli bir pazara sahiptir ve birçok firma elektrikli araçlara yatırım yapmakta ve üretim süreçlerini elektrikli araçlar yönünde evirmektedir. Bataryalı elektrikli araçlar, yüksek kapasiteli bataryalı ve elektrik motora sahip tamamen elektrikli araçlardır. Benzinli motoru, yakıt hücresi ve yakıt deposu yoktur. Elektrik motorunu ve tüm yerleşik elektronikleri çalıştırmak için tüm gücü bataryadan alır. Bu elektrikli araçları şarj etmenin tek yolu, harici bir kaynaktan elektrik kullanmaktır. Bileşenlerin hasar görmesi ve bozulması nedeniyle pil performansı önemli ölçüde düşebilir. Sınırlı sürüş menzili ve çok yüksek satın alma maliyeti, düşük maliyetli elektrikli araçlar üretmenin önündeki kritik engellerdir. Elektrikli bir aracın başarısı veya başarısızlığı, bataryanın performansına bağlıdır. Mevcut batarya teknolojilerinin dezavantajlarını ortadan kaldırmak için dünyanın dört bir yanındaki Ar-Ge kuruluşları, otomotiv şirketleri ve üniversiteler EA uygulamaları için yeni teknolojiler geliştirmeye çalışıyor. Günümüzde de çeşitli batarya teknolojileri, elektrikli araçlarda görülmektedir. Bu kadar ilgi gören elektrikli araçların batarya seçimine dikkat edilmektedir. Elektrikli araçlarda yeniden doldurulabilir batarya teknolojileri bulunmaktadır ve tercih edilen bataryalar ömürlük değildir. Batarya ömrünün kısa olması ve birkaç yıl içerisinde değişim gerektirmesi araç maliyetlerini arttırmaktadır (Kerem, 2014). Bataryalar doğru kullanılmamış veya geri dönüşümsüz olduğu takdirde sadece kaynak israfına neden olmayıp, çevre kirliliğine de neden olmaktadır (Ordones vd., 2016). Bununla birlikte araçlarda kullanılacak olan bataryalar geri dönüşüm esası olarak gelişme göstermektedir. Elektrik motorunun ihtiyacı olan elektrik enerjisi bataryalardan sağlanmaktadır (Öztürk, 2018; Chan, 2013). Elektrikli araçlarda bataryanın uzun menzilde yetersizliği ve enerjiyi depolama bir sorun olmakla birlikte, EA'lara olan ilginin azalmasına sebep olmaktadır (Huo vd, 2015). Bu sebeple elektrikli araçlarda en önemli sorunlardan biri batarya seçim problemdir. Elektrikli araçların kullanımındaki artış, yenilenemez enerji kaynakları ve yakıt maliyetlerini düşürmektedir (Von vd., 2015).

Elektrikli araçlarda yaygın olarak Pb-asit (Kurşun-Asit), Ni-Cd (Nikel Kadmiyum), Ni-MH (Nikel Metal Hidrat) ve Li-ion (Lityum İyon) pilleri tercih edilmektedir. Son zamanlarda bunlara ilave olarak Alüminyum-Hava ve Çinko-Hava bataryaları geliştirilmiştir Bowkett vd., 2013). Lityum iyon piller yüksek anma voltajı, yüksek enerji yoğunluğu, uzun ömür ve hafıza etkisinin bulunmaması gibi önemli avantajlarından dolayı diğer pil teknolojilerine kıyasla en çok tercih edilen batarya çeşididir (Vu vd., 2013). Ancak lityum iyon piller henüz istenilen düzeye ulaşmadığı için gelişim göstermeye devam etmektedir.

Elektrikli araçlarda kullanılan bataryalar üzerine literatür de birçok çalışma vardır. Bu çalışmalar bataryaların birbiriyle karşılaştırılması, batarya tasarımı, batarya şarj kontrol yöntemleri (Raslavicius vd., 2015; Erhan vd., 2013), batarya şarj cihazlarının yerleşim çalışmaları (Sierzchula vd., 2014), batarya teknolojilerinin geliştirilmesi (Demir ve Aküner, 2018; Dikmen, 2018) ve daha uzun menzilde verimli çalışmasına yönelik yapılan çalışmalardır. Tüm bu çalışmalar elektrikli araçların geliştirilmesi için altyapının oluşturulması ve elektrikli araçlarda kullanılmak üzere seçimi yapılacak olan batarya sistemlerine zemin hazırlamaktadır (Raslavicius vd., 2013; Battery University, 2014). Elektrikli araç ve batarya teknolojileri alanında yapılan çalışmalar Tablo 1' de gösterilmiştir.

Tablo 1. Elektrikli araç ve batarya teknolojisi alanında yapılan çalışmalar

Nu.	Yazar/lar	Yıl	Karar Problemi	Çalışmanın amacı	Teorik/Uygulama
1	Aktaş vd.	2021	---	Batarya yönetim sistemi tasarımı	---
2	Celen ve Kaba	2021	Batarya teknolojisi	Elektrikli araçlarda kullanılan silindirik lityum iyon bataryaların soğutulmasının parametrik incelenmesi	Teorik
3	Hamurcu ve Eren	2020	Ulaşım planlama	Elektrikli otobüs seçimi	Uygulama (AHP-TOPSIS)
4	Kaymaz ve Demir	2020	Araç teknolojisi	Elektrikli Otomobiller için Çekiş Motor Tip Seçimi.	---
5	Gavcar ve Kara	2020	Ulaşım	Elektrikli Otomobil Seçiminde	Entropi-TOPSIS
6	Sun vd.	2019	Stratejik planlama	Batarya değişimi ve şarj etme stratejileri	---
7	Demir ve Aküner	2018	Enerji kazanımı	Frenleme ile kaybedilen enerjinin geri kazanılması değerlendirmeleri	Uygulama (Taguçi)
8	Cano vd.	2018	---	Gelişen batarya teknolojisinde, araba pazarının değerlendirilmesi	Teorik
9	Öztürk	2018	---	Taşımacılıkta elektrikli araç kullanımının incelenmesi	Teorik
10	Tarlak ve İşen	2018	---	Elektrikli araçlar ve batarya şarj sistemlerinin değerlendirilmesi	Teorik
11	Güven ve Rende	2017	....	Elektrikli araç tasarımında malzeme seçimi öneminin değerlendirilmesi	Teorik
12	Ogura ve Kolhe	2017	...	Elektrikli araçlar için batarya teknolojilerinin değerlendirilmesi	Teorik
13	Sarı Kurt ve Balıkç	2017	---	Batarya çalışma süresini uzatmak	DeneySEL
14	Ahmadi vd.	2016	....	Hızlı şarj istasyonları üzerine bir inceleme	Teorik
15	Debreceni vd.	2016	Bataryalar için istasyonlar	Elektrikli araçlar için batarya sistemleri tasarımı gerçekleştirme	Uygulama
16	Guo ve Zhao	2015	Yer seçimi	Elektrikli araç şarj istasyonunun optimum yer seçimini belirleme	Uygulama (Bulanık TOPSIS)
17	Sergio ve Florin	2015	---	Biyolojik sistemlerin incelenmesi ve bataryaların çevre üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi	Teorik
18	Ustabaş	2014	...	Mikro ve Makro etkileri yönünden elektrikli araçların değerlendirilmesi	Teorik
19	Uçarol vd.	2014	.....	Hibrid ve elektrikli araçlar için ulaşımda enerji verimliliğinin değerlendirilmesi	Teorik
20	Özkop	2013	Batarya tasarımı	Elektrikli araçlar için şarj cihazı tasarımı	Uygulama (Benzetim)
21	Yazıcı ve Özdemir	2013	.....	Elektrikli araç şarj yöntemlerinin değerlendirilmesi	Teorik
22	Satılmış ve Meşe	2011	Batarya tasarımı	Verimli ve optimum şarj sağlayan batarya şarj cihazlarının tasarlanması	Teorik
23	Gören	2011	...	Hibrid ve elektrikli araçların sağladığı enerji tasarrufu ve çevreci operasyonlarının belirlenmesi	Teorik
24	Hofman ve Dai	2010	...	Elektrikli araç için enerji verimliliği analizi değerlendirmesi	Teorik
25	Tuncay ve Üstün	2004	....	Otomotiv elektroniğindeki gelişmelerin incelenmesi	Teorik

Elektrikli araçlar ile ilgili geçmişten günümüze literatürde yapılmış birçok çalışma vardır. Yapılan bu çalışmalar sayesinde elektrikli araçlar hakkında daha fazla bilgi edinmekle birlikte avantaj ve dezavantajlarını karşılaştırma fırsatı bulmaktayız. Bunun beraberinde gelişmekte olan batarya teknolojileri ve batarya şarj istasyonları elektrikli araçların ilerleme sürecine önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Bu çalışmanın literatüre katkısı ise elektrikli araç teknolojisinin gelişmesinde önemli bir faktör olan batarya sistemlerinin seçimi hakkında yapılan birkaç çalışmadan biri olmasıdır.

3. Elektrikli Araçlarda Batarya Teknolojisi

Elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlu araçlar, hibrit elektrikli araçlar ve tümü elektrikli araçlar olmak üzere enerji kaynağı ve motor tahrik yöntemine göre üç grup altında sınıflandırılmıştır (Gears educational system, 2014). Elektrikli aracın genel çalışma prensibi: elektrik motorunun ihtiyacı olan enerji bataryalardan sağlanmaktadır ve motorun hareketi ise aktarma organı ile tekerlere iletilmektedir (Elbir and Koca, 2013). Bu araçlarda kullanılmak üzere batarya teknolojileri bulunmaktadır. Bataryaların enerji kapasitesinin artırılması amacıyla araştırmalar devam etmektedir. Farklı malzemeler geliştirilerek batarya ömrü ve kapasitesi iyileştirilmeye çalışılmaktadır.

Yeterli şarj olduğunda batarya da mevcut olan motor, batarya gücünü kullanarak aracın hareket etmesini sağlar. Batarya hızlı bir şekilde şarj edilmelidir, fakat deşarj oranı daha az olmalıdır. Batarya şarj cihazından istenen bazı özellikler; yüksek verimlilik, uygun maliyet, aşırı akım, gerilim ve şarj-deşarj durumu gibi bazı kriterlerdir. Temel olarak yüksek güç uygulamaları için Li-ion, Ni-MH, Ni-Cd ve Pb-asit bataryalar kullanılır. Bundan dolayı elektrikli araç uygulamaları için uygun bataryalar olarak tercih edilmiştir. Bataryalarda bulunan pil özellikleri enerji yoğunluğu, elektriksel verimlilik, dayanıklılık, enerji/çevrim, spesifik enerji, deşarj oranı ve nominal gerilim olarak belirlenmiştir. Elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan pil teknolojileri ve özellikleri Tablo 2’de gösterilmiştir (Yong, 2016; Keçek ve Yüksel, 2016).

Tablo 2. Batarya Teknolojileri

Özellikleri	Birim	Li-ion	Ni-MH	Ni-Cd	Pb-asit
Spesifik enerji	Wh/kg	180	70	50	35
Enerji yoğunluğu	Wh/l	180	140	100	70
Elektrik verimliliği	%	85	66	90	90
Deşarj oranı	%/ay	5	30	10	20
Nominal gerilim	V	3.6	1.2	1.2	2.0
Enerji/çevrim	Wh	8.6	7.5	4.5	24
Dayanıklılık	cycles	1200	1000	2000	800

Değerlendirme kriterleri olarak batarya seçiminde önemli 7 faktör belirlenmiştir; spesifik enerji (K1), enerji yoğunluğu (K2), elektrik verimliliği (K3), deşarj oranı (K4), nominal gerilim (K5), enerji/çevrim (K6) ve dayanıklılık (K7).

Pb-asit piller birçok uygulama ve araçta kullanılmakta olan yaygın bir pil teknolojidir. Bu piller yüksek güç uygulamaları için tasarlanmıştır. Aynı zamanda ucuz ve güvenilirdir. Yüksek deşarj akımı, düşük özboşalım, hafıza etkisinin bulunmaması, düşük özgül enerjiye ve sıcaklığa karşı hassas bir pil çeşididir. Dolayısıyla, bu piller kullanılmadıkları zaman pil ömürleri düşmektedir. Pb-asit bataryadan daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip, güvenli ve ucuz bir pil teknolojidir. Ayrıca zayıf şarj/deşarj verimi, yüksek özboşalım ve hafıza etkili olması da dezavantajlarındandır (Keçek ve Yüksel, 2016). Ni-MH pilleri eşdeğer Ni-Cd hüccesine göre 2-3 kat daha fazla kapasiteye sahiptir ve Ni-MH pil teknolojisi Ni-Cd pillerin dezavantajlarına alternatif olarak geliştirilmiştir. Ni-MH ile ilgili dezavantajlar, yüksek öz deşarj oranı, daha yüksek sıcaklıkta ısı üretimi ve daha yüksek maliyete sahip olmasıdır. Nominal voltaj değerleri eşit olmasıyla birlikte nikel metal hidrat piller daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir (Keçek ve Yüksel, 2016). Li-ion piller, düşük toksit, yüksek kapasite ve ucuz olması avantajları nedeniyle diğer materyallere göre lityum metal oksitler kullanılmaktadır. Yüksek enerji verimliliğine sahip olan Li-ion aküler, daha yüksek enerji barındırırlar. Li-ion pilleri en çok tercih edilen pil çeşidi olup yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir (Keçek ve Yüksel, 2016). Elektrikli araçlarda kullanılan birçok batarya çeşidi bulunmaktadır. Farklı anma voltajı ve enerji yoğunluğuna sahip batarya teknolojileri gelişim göstermektedir. Yaygın olarak kullanılan dört pil haricinde; LiPo, LiFePO₄, Li-S, Zn-air, Zebra vb. gibi henüz araştırma aşamasında olan batarya teknolojileri de bulunmaktadır (Yong, 2015).

4. Yöntemler

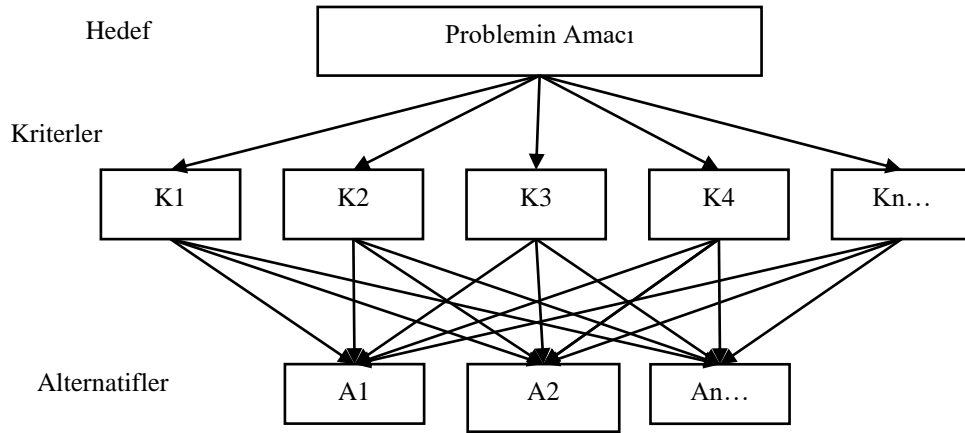
Ulaşım araçlarının tasarımı ile ilgili ortaya çıkan karmaşık sorunları çözmek için, ÇKKV yöntemlerinin uygun araçlardan biri olduğu görülmektedir. ÇKKV temelde çok çeşitli metodolojileri içeren yöneylem araştırmasından doğmuştur, ancak yine de diğer disiplinlerde rasyonel bir temele sahiptir. ÇKKV teknikleri, tarımsal kaynak yönetimi, eğitim, ulaşım, yatırım, çevre, savunma, sağlık hizmetleri vb. ile ilgili özel sektör kararlarının ve kamu sektöründe geniş uygulama alanı bulmuştur. ÇKKV yöntemleri ile elektrikli araçlarda batarya seçimine yönelik yapılan bu çalışmada, AHP, MOORA ve AHP-MOORA olmak üzere üç farklı uygulama yapılmıştır. Karar verme süreçlerinde AHP ve MOORA yöntemleri ayrı ayrı kullanıldığı gibi bütünlük (AHP-MOORA) uygulamaları da yapılmıştır.

4.1. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP)

AHP, Saaty tarafından geliştirilen analitik bir karar verme sürecidir ve süreç basit matematiksel hesaplamaları içerir (Saaty 1990). AHP, ikili karşılaştırmaya dayalı yapılandırılmış, alternatiflerin kriterlerinin ağırlıklarını ve önceliklerini belirlemek için geniş çapta uygulanan çok kriterli bir karar verme yöntemidir. Problemin hedefi, değerlendirme kriterleri ve alternatiflerden oluşan karar hiyerarşisi doğrultusunda, karmaşık karar problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır. AHP, problemi hiyerarşik bir şekilde, hedeften ölçütlere, alt ölçütlere ve ardışık düzeylerde alternatiflere inerek yapılandırır (Saaty, 1990). Hiyerarşi, uzmanlara bağlamın doğasında bulunan karmaşık ilişkilerin genel bir görünümünü sağlar ve aynı seviyedeki unsurların karşılaştırılabilir olup olmadığını değerlendirmelerine yardımcı olur. Öğeler daha sonra ağırlıklarını elde etmek için 9 seviye ölçeğine göre ikili olarak karşılaştırılır. AHP uygulama adımları sırası ile verilmiştir;

4.1.1. Hiyerarşik yapının oluşturulması

Karar hiyerarşisi hedef, kriterler (K1, K2, K3,...Kn) ve alternatifler A1, A2,..., An) olarak 3 seviyeden oluşmaktadır. Gerek duyulduğunda kriterler alt kriterlere de ayrılabilir. Hiyerarşik yapı Şekil 1'deki gibi kurulmuştur.



Şekil 1. AHP karar hiyerarşisi

4.1.2. İkili karşılaştırma matrisleri ve üstünlük belirlenmesi

İkili karşılaştırmalar önce kriterin kendi aralarında ve daha sonra her kriter için alternatifleri kendi aralarında ikili karşılaştırmalara tabi tutulur. Karşılaştırmalarda Tablo 3'teki Saaty'nin (Saaty, 1990) önem skalası değerleri kullanılarak (nxn) ikili karşılaştırma matrisi oluşturulur.

Tablo 3. Saaty önem derece tablosu

Önem Derecesi	Açıklama
1	İki faktör arası "eşit önemli" ise
3	Biri diğerine göre "orta derecede" daha önemli ise
5	"Kuvvetli düzeyde" önemli ise
7	"Çok kuvvetli düzeyde önemli" ise
9	"Aşırı derecede önemli" ise
2,4,6,8	Ara değerler

4.1.3. Özvektör değeri ve tutarlılık oranı hesaplanması

İkili karşılaştırma matrisinin normalleştirilmesi ve satır ortalamalarının alınması özvektör elde edilir (Özvektörü $-W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$). Özvektör (w) değeri (1) numaralı formül ile hesaplanır.

$$w = \frac{\sum_{j=1}^n c_{ij}}{n} \quad (1)$$

Özvektör değerinin hesaplanmasının ardından yapılan hesaplama ve karşılaştırmaların tutarlı olup olmadığı test edilir. Tutarlılık oranı (CR)'nin test edildiği bu süreçte, formül (2) kullanılır. Bu formülde tutarlılık göstergesi (CI), formül (3) ve (4) kullanılarak hesaplanır. Rassallık indeksi (RI) ise Tablo 4'ten okunur (Elbir ve Koca, 2013).

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

Tutarlılık göstergesinin (CI) hesaplanmasında, (3) numaralı formül kullanılır.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

CI değeri için ayrıca en iyi öz değer (λ_{max}) hesaplanmasında (4) numaralı formül kullanılır.

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (4)$$

Formül (2) 'de yer alan rassal indeks (RI) değeri (Palaz ve Kovacı, 2008) Tablo 4'de gösterilmektedir.

Tablo 4. RI Değerleri

N	RI	N	RI	N	RI	N	RI
1	0	4	0,90	8	1,41	11	1,51
2	0	5	1,12	9	1,45	12	1,48
3	0,58	6	1,24	10	1,49	13	1,56

4.1.4. Alternatiflerin önem sıralamasının bulunması

Kriterlerin değerlendirmesi için uygulanan adımları alternatiflerin değerlendirmesi için de uygulanır ve her kriter için alternatifler ikili karşılaştırmalara tabi tutulur. Yapılan karşılaştırmalar ve basit matematiksel işlemler sonucunda kriter ve alternatiflerin ağırlıkları ayrı ayrı elde edilir. Bu ağırlıkların matris çarpımları sonucunda alternatiflerin önem seviyeleri elde edilir. Bu değerler büyükten küçüğe sıralanarak, en büyük değer, birinci seçimi oluşturacak şekilde devam eder.

AHP yöntemi birçok karar probleminde seçim ve değerlendirme amacıyla uygulanmıştır. Denizcilik alanında (Adıgüzel, 2009); personel seçimi (Yılmaz ve Dağdeviren, 2010); program seçimi problemi (Tunca vd., 2015); trafik kazaları arasındaki ilişkinin analizi (Kılınççı ve Önal, 2011) AHP yöntemiyle yapılmıştır. Tedarikçi seçimi (Ömürbek vd., 2013); hassas bölgelerin analizinde (Çellek, 2013); proje seçimi (Dinç vd., 2018) ve ulaşım planlama (Taş vd., 2017) konularında AHP yöntemi kullanılmıştır. AHP yöntemi diğer ÇKKV yöntemleri ve matematiksel modeller ile de karma olarak kullanılmıştır (Hamurcu ve Eren, 2020; Gür vd., 2017; Hamurcu ve Eren, 2017; Hamurcu vd., 2017; Deringöz vd., 2021).

4.2. MOORA Yöntemi

MOORA (Multi Objective Optimization on the Basis of Ratio Analysis) ilk kez 2006 yılında Brauers ve Zavadskas tarafından uygulanmıştır. Bu yöntemin en önemli avantajı: alternatifler ve amaçlar arası bütün etkileşimleri aynı anda dikkate alarak, tarafsız ve bütünlük bir karar verme sürecinin içermesidir (Brauers vd., 2010). Literatürde bulunan MOORA metotları; Oran yöntemi, Referans noktası yaklaşımı, Önem katsayısı yaklaşımı, Tam çarpım yaklaşımı ve Multimoora yaklaşımı olarak verilmiştir.

Bu metotlar temel olarak birinci sırada yer olan oran metodu ile başlar. MOORA kendi başına bir metot olmayıp; farklı MOORA metotları sonucu farklı sıralamalar ortaya çıkmaktadır. Birden fazla metot olması, son bir değerlendirme yapılmasını sağlamakta ve mevcut ÇKKV metotları arasında güvenilirlik açısından en üst seviyeye taşımaktadır.

Aşama 1. Amaçların Belirlenmesi ve Alternatiflerin Performans Değerlerinin Belirlenmesi

Başlangıç matrisinin oluşturulması, alternatiflerin ve amaçların performans değerlerinin belirlenmesiyle başlar. MOORA yönteminin ilk adımında kullanılan başlangıç matrisi tablosu oluşturulur. Belirtilen matrise ilişkin ifadeler (x_{ij}: i. alternatifin j. ölçüt açısından performans ölçüm değeri, i: alternatif j: nitelik ya da ölçüt, m: toplam alternatif sayısı, n: toplam nitelik ya da ölçüt) şeklinde belirtilir.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

x_{ij} : 1 alternatifinin j nci amaçtaki değeri

Aşama 2. Matrisin Normalleştirilmesi

Formül (5) kullanılarak alternatif değerlerin performans değerleri, performans değerlerinin karesinin toplamına bölünerek karekökünün alınması ile hesaplanır.

$$X_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (5)$$

Sonrasında tüm alternatifleri temsil edecek olan bir payda değeri hesaplanır. Burada;

X_{ij}^* : i. Alternatifin, j. amaca göre normalleştirilmiş performans değerini göstermektedir. $(-1 \leq x_{ij} \leq 1)$

Aşama 3. Normalleştirilmiş matrisin en büyükleme performans değerleri toplamından en küçükleme performans değerleri toplamının çıkarılması

MOORA oran metodu ile çözüm hesaplaması (6) numaralı formül ile gösterilir.

$$y_i = \sum_{j=1}^g x_{ij} - \sum_{j=g+1}^n x_{ij} \quad (6)$$

Eşitlik (6)'da;

g: en büyüklenecek faktör sayısı

(n-g): en küçüklenecek faktör sayısı

y_i : i. alternatifin tüm amaçlara göre normalleştirilmiş değerleridir.

Sonuçta bulunan y_i değerleri küçükten büyüğe doğru sıralanması ile birinci sıradaki alternatif en iyi seçenek olarak kabul edilir.

MOORA referans metodu ile çözüm hesaplaması (7) numaralı formül ile gösterilir.

$$\max\{\min|r_{i-x_{ij}}|\} \quad (7)$$

Turizm sektörü ile ilgili sorunların MOORA yöntemi kullanılarak çözümü açısından bir model önermektedir (Mandal ve Sarkar, 2012). MOORA yöntemi ilk olarak "Control and Cybernetics" isimli çalışmada Willem Karek Brauers ve Edmundas Kazimieras Zavadskas tarafından en iyi akıllı üretim sisteminin seçimi için uygulanmıştır (Dey vd., 2012). MOORA yönteminin, fayda ve maliyet kriterleri için ayrı ayrı matematiksel hesaplamalar içermesinin, yanında diğer ÇKKV modellerine göre, bir üstünlük sağladığı görülmüştür (Yıldırım, 2015). Tedarikçi seçimi probleminde çalışılmıştır (Vatansever ve Uluköy, 2013), bir inşaat projesi için yüklenici seçiminde MOORA yöntemini kullanarak çözüm bulmaya çalışmışlardır. Üretim sektörü için en uygun kurumsal kaynak planlaması yazılımı seçimi için kullanmışlardır (Brauers ve Ginevičius, 2013), yatırım planlama risk değerlendirmede (Özdağoğlu, 2014), işletmelerin karar verme aşamalarında kriterleri değerlendirmek için kullanılmıştır (Parks vd., 2007). Ayrıca ulaşım alanında da uygulamaları vardır (Hamurcu ve Eren, 2021).

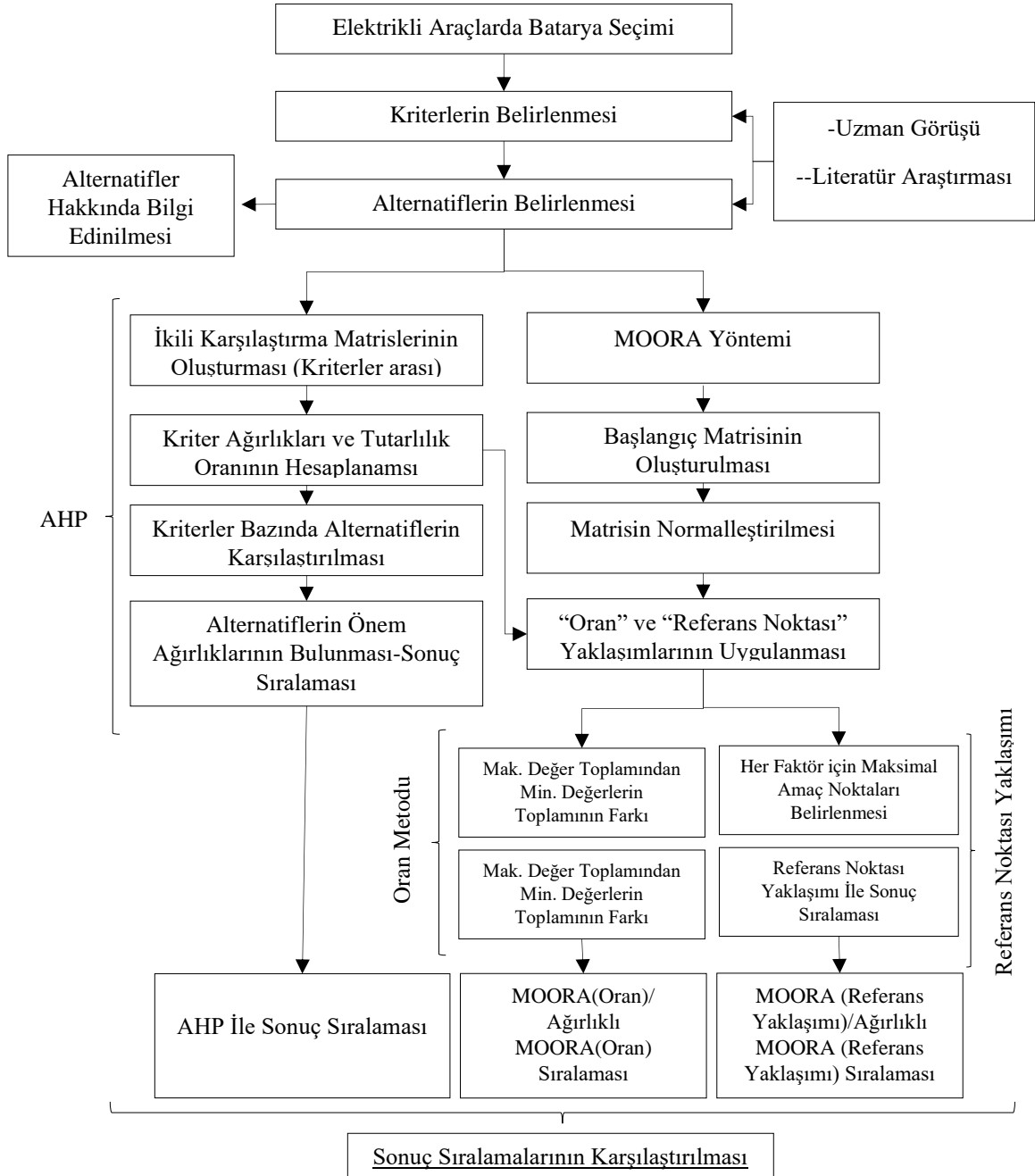
5. Uygulama

Elektrikli araçlarda, aracın hareketi sadece bataryadan sağlanan elektrik enerjisiyle elektrik motorundan sağlanmaktadır. Bataryaların yavaş şarj olması ve uzun menzilde yetersiz kalması gibi başlıca sebeplerden dolayı elektrikli araçlarda batarya seçimi oldukça

önemlidir. Bu sebeple elektrikli araçlarda kullanılan batarya teknolojilerinin gelişimi gün geçtikçe artmaktadır. Bu çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılmak üzere batarya seçiminde ÇKKV yöntemlerinden olan AHP ve MOORA yöntemi ile alternatif bataryalar arasından seçim yapılmıştır. Bu çalışmada uzman görüşleri doğrultusunda sekiz batarya arasından, kullanıcı perspektifine en uygun dört batarya değerlendirilmiştir.

5.1. Araştırma Metodolojisi

Karar verme probleminin belirlenmesi ile başlayan süreçte kriterler ve alternatiflerin belirlenmesinden sonra problem, AHP ve MOORA (oran ve referans noktası) yöntemleri ile çözümü yapılmıştır. Bunun beraberinde AHP ağırlıklı MOORA yöntemi ile çözümü de yapılmıştır. AHP ve MOORA yöntemlerinin adımları sırasıyla gösterilmiştir ve sonuç sıralamaları belirlenmiştir. Araştırma metodolojisi Şekil 2’de verilmiştir. Değerlendirme kriterleri literatür araştırması ve uzman görüşleri doğrultusunda bataryaların özellikleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Alternatif bataryalar, 8 batarya teknolojisi arasından uzmanların görüşleri ve akademik çalışmalar temel alınarak 4’e indirilmiştir. Karar sürecinde, akademisyen uzmanların değerlendirmelerine başvurulmuştur. Karar sürecinde önce AHP yöntemi ve MOORA yöntemleri ayrı ayrı uygulanmış ve akabinde AHP-MOORA yöntemleri karma olarak birlikte uygulanmıştır. Uygulamalar sonucunda ortaya çıkan sıralamalar karşılaştırılmıştır.



Şekil 2. Araştırma Metodolojisi

Çevresel endişelerin artması, ekonomik nedenler, fosil enerjinin tükenmesi ile yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimin artması elektrikli araçlara yönelimi hızlandırmıştır. Elektrikli araçların daha kısa menzilleri ve şarj süreleri nedeniyle batarya teknolojilerinin daha da geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu kapsamda çeşitlenen ve geliştirilen batarya teknolojileri arasında hem üreticiler hem de tüketiciler bağlamında bir karar verme süreci gerekmektedir. Bu noktada araştırmanın önemi, elektrikli araçların gelişimi için kilit konumda olan bataryaların gelişmesi ve çeşitlenmesiyle beraber elektrikli araçların tercih edilmelerinde artış olacağı beklenmektedir. Dolayısıyla bu çalışma ile gelişen teknoloji ile çeşitlenen batarya teknolojilerinin karşılaştırılması ve sıralanması yapılarak en iyi olan alternatif belirlenmiştir. Ayrıca kullanıcıların araç satın alma süreçlerine yardımcı olabilecek bir karar verme süreci ortaya konulmuştur.

5.2. Alternatiflerin Belirlenmesi

Elektrikli araçlar için birçok batarya teknolojisi bulunmaktadır ve gelişim aşamasındadır. Uzman görüşleri doğrultusunda alternatifler belirlenmiştir. Elektrikli araçlarda kullanılmak üzere tercih edilen bataryalar arasından, uzman görüşler doğrultusunda sekiz batarya arasından kullanıcı perspektifine en uygun dört batarya seçilmiştir. Bunlardan en çok tercih edilen bataryalar Pb-asit (Kurşun-Asit), Ni-Cd (Nikel Kadmiyum), Ni-MH (Nikel Metal Hidrat) ve Li-ion (Lityum İyon) pillerdir (Bowkett vd., 2013). Bu sebeple alternatiflerimiz olarak bu dört batarya değerlendirmeye alınmıştır.

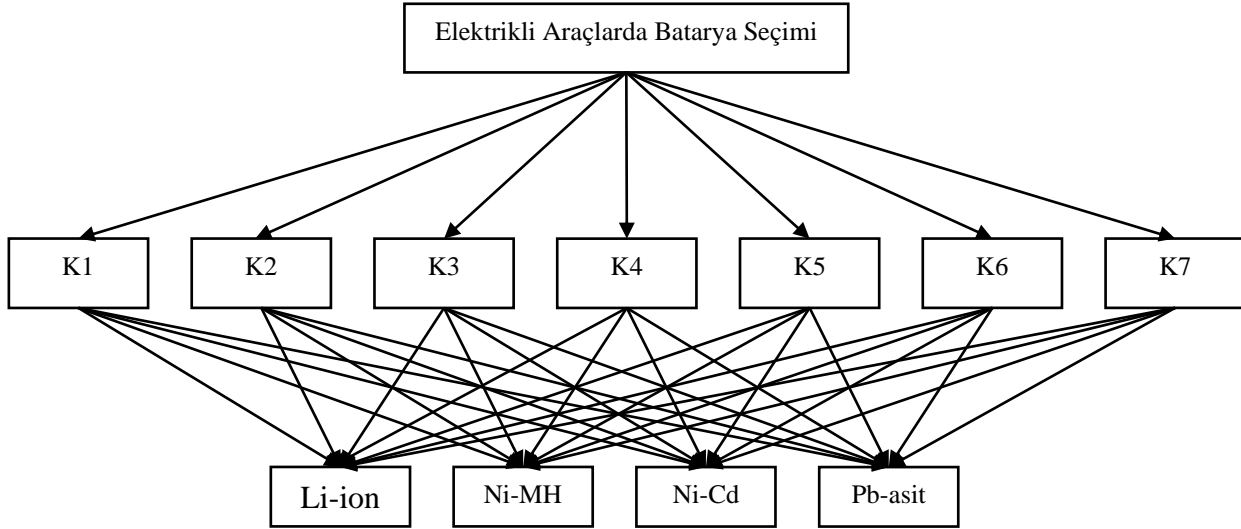
5.3. AHP Uygulaması

AHP yöntemi, belirli bir karar hiyerarşisi içinde hedef, değerlendirme kriteri ve alternatifler doğrultusunda ağırlıklandırma veya sıralama yapan Thomas L. Saaty tarafından 1970 yılında geliştirilen bir karar verme sürecidir (Cao vd., 2008).

Elektrikli araçlarda kullanılmak üzere batarya seçimi probleminde yedi kriter, dört alternatif belirlenmiştir. Kriterler sırasıyla K1 (spesifik enerji), K2 (enerji yoğunluğu), K3 (elektrik verimliliği), K4 (deşarj oranı), K5 (nominal gerilim), K6 (çevrim) ve K7 (dayanıklılık) şeklinde kısaltılarak gösterilmiştir. Yapılan çalışmada Endüstri Mühendisliği (1 profesör, 2 Dr. Öğrt. Üy., 1 Öğretim görevlisi ve 1 araştırma görevlisi) ve Kimya bölümü (1 Doç. Dr. ve 1 Dr. Öğrt. Üy.) öğretim üyelerinden yararlanılmış olup, uzman görüşleri doğrultusunda çalışmanın akışına yön verilmiştir.

Aşama 1. Hiyerarşik Yapının Oluşturulması

Amaç, kriterler ve alternatifler belirlenerek hiyerarşik yapı oluşturulmaktadır. Yedi kriter, dört alternatif belirlenmiştir. Hiyerarşik yapı Şekil 3'deki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 3. AHP Hiyerarşik Yapısı

Aşama 2. İkili Karşılaştırmalar Matrisinin Oluşturulması

Hiyerarşik yapı meydana getirildikten sonra kriterlerin göreceli önem derecelerini gösteren ikili karşılaştırma matrisi (üstünlükler belirlenir) hesaplanmaktadır (Garcia-Cascales ve Lamata, 2009). İkili karşılaştırma matrisi $n \times n$ boyutunda bir matristir. Aşağıda Tablo 5'de ikili karşılaştırma matrisi gösterilmiştir.

Tablo 5. İkili Karşılaştırma Matrisi

Kriterler	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
K1	1	7	5	3	3	3	7
K2	1/7	1	3	5	5	5	7
K3	1/5	1/3	1	5	7	5	3
K4	1/3	1/5	1/5	1	3	3	7
K5	1/3	1/5	1/7	1/3	1	3	7
K6	1/3	1/5	1/5	1/3	1/3	1	7
K7	1/7	1/7	1/3	1/7	1/7	1/7	1

Aşama 3. Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi

Tablo 6' de sütun değerlerinin ortalamaları alınarak kriterler için özvektör hesaplanması gösterilmiştir. Hesaplanan özvektör değerleri kriterlerin ağırlıklarını ifade etmektedir.

Tablo 6. Özvektörün Belirlenmesi

Kriter	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
K1	0,402	0,771	0,506	0,202	0,154	0,148	0,179
K2	0,057	0,110	0,303	0,337	0,256	0,248	0,179
K3	0,080	0,036	0,101	0,337	0,359	0,248	0,076
K4	0,134	0,022	0,020	0,067	0,154	0,148	0,179
K5	0,134	0,022	0,014	0,022	0,051	0,148	0,179
K6	0,134	0,022	0,020	0,022	0,017	0,049	0,179
K7	0,057	0,015	0,033	0,009	0,007	0,007	0,025
Öz vek.	0,337	0,213	0,177	0,103	0,081	0,063	0,022

Aşama 4. Tutarlılık Oranının Hesaplanması

(2) numaralı formül kullanılarak tutarlılık oranını (CI) hesaplanmaktadır. Tablo 7'de kriterlerin özvektörleri gösterilmiştir.

Tablo 7. Kriterlerin Özvektörleri

Kriterler	Kriterlerin öz vektörleri	Tutarlılık oranını (CI)
K1	0,337	$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = 0,62007$
K2	0,213	
K3	0,177	
K4	0,103	Tutarlılık oranı (CR)
K5	0,081	$CR = \frac{CI}{RI} = 0,004698$
K6	0,063	
K7	0,022	

Tutarlılık oranı 0,10 'dan küçük çıktığı için matris tutarlıdır, kabul edilir. Tutarlılık oranı kabul edilebilir seviyede ise alternatiflerin öncelik sıralamasına geçilmektedir.

Alternatifler ayrı ayrı yedi değerlendirme kriteri bakımından karşılaştırılarak önem seviyeleri bulunur. Tablo 8'de alternatiflerin kriterler bazında özvektörleri gösterilmiştir ve en büyük değeri alan alternatif seçilmektedir (Dinçer ve Görener, 2011).

Tablo 8. Alternatiflerin Özvektörleri

Alter.	Alternatiflerin Özvektörleri						
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
Li-ion	0,526	0,557	0,559	0,139	0,166	0,465	0,415
Ni-MH	0,255	0,263	0,222	0,481	0,498	0,292	0,291
Ni-Cd	0,151	0,121	0,086	0,243	0,241	0,196	0,057
Pb-asit	0,066	0,056	0,131	0,136	0,093	0,045	0,236

Alternatiflerin her bir kriter için ikili karşılaştırması yapılır ve ilk dört adım tekrar edilir. Daha sonra her alternatifin, her kriter bazındaki değerini o kriterin ağırlık puanıyla çarparak bulunduğu satır toplanır ve sonuç sıralanır. Tablo 9’da batarya seçim probleminin AHP ile çözümünün önem ağırlıkları ve sonuç sıralaması gösterilmiştir.

Kriterler ve alternatifler arasında yapılan değerlendirmeler, karşılaştırmalar sonucunda en iyi batarya Li-ion pil olarak belirlenmiştir. Yedi kriterin, altısında en iyi batarya Li-ion bataryadır. Deşarj oranının düşük olması tercih sıralamasında önemli bir etken olmasına rağmen diğer kriterler de en iyi olması tercih sıralamasında birinci sırada yer almasını sağlamaktadır. AHP ile çözümü yapılan elektrikli araçlarda batarya seçimi probleminin sonuç sıralaması; Li-ion, Ni-MH, Ni-cd ve Pb-asit şeklinde sıralanmıştır.

Tablo 9. AHP ile Sonuç Sıralaması

Alternatifler	Önem Ağırlığı	Sıralama
Li-ion	0,462	1
Ni-MH	0,297	2
Ni-Cd	0,151	3
Pb-asit	0,087	4

5.4. MOORA Uygulaması

MOORA metodu uygulanarak, elektrikli araçlarda batarya seçimi probleminin çözümü yapılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan veriler, AHP uygulamasında kullanılan verilerle aynıdır. Tablo 2’de veriler gösterilmiştir.

5.4.1. MOORA Oran Metodu

MOORA yönteminde farklı alternatiflerin farklı amaçlara karşılık gelen değerlerinden oluşan matrislerin hazırlanması ile başlamaktadır. Oluşturulan matris Tablo 10’da gösterilmiştir.

Tablo 10. Kriter Değerleri

Alt.	Li-ion	Ni-MH	Ni-Cd	Pb-asit
K1	180	70	50	35
K2	180	140	100	70
K3	85	66	90	90
K4	5	30	10	20
K5	3,6	1,2	1,2	2
K6	8,6	7,5	4,5	24
K7	1200	1000	2000	800

Aşama 1. MOORA metodu ile normalleştirme

Formül (5) ve (6) kullanılarak, X_{ij}^* ’ler bulunur. Burada önemli işlemlerden biri de kriter değerlerinde, max ve min durumlarının belirlenmesidir. Normalleştirilmiş değerler Tablo 11 ‘de gösterilmiştir.

Tablo 11. MOORA Metodu ile Normalleştirilmiş Değerler

Alt.	max K1	max K2	max K3	min K4	max K5	max K6	max K7
Li-ion	0.888	0.695	0.509	0.132	0.808	0.319	0.450
Ni-MH	0.345	0.541	0.395	0.794	0.269	0.278	0.375
Ni-Cd	0.246	0.386	0.539	0.264	0.269	0.166	0.751
Pb-asit	0.172	0.270	0.539	0.529	0.449	0.890	0.300

Optimizasyon için, değerler en düşük ve en yüksek olma durumlarına göre toplanır. Elektrikli araçlarda batarya seçimi problemini MOORA yöntemi ile çözümünün tercih sıralaması Li-ion, Ni-cd, Ni-MH ve Pb-asit şeklinde belirlenmiştir.

5.4.2. MOORA referans metodu ile çözüm

AHP ve MOORA yöntemleriyle ayrı ayrı çözümü yapılmıştır. Daha sonra kriter ağırlıklandırma işlemleri için AHP yöntemi kullanılmıştır. Alternatiflerin sıralanması işlemi ise MOORA yöntemiyle yapılmıştır. Aşağıda Tablo 12’ de AHP, MOORA (referans-oran) ve bütünlük AHP-MOORA (referans-oran) yöntemleriyle çözüm sonuçları gösterilmiştir.

Bu çalışmada elektrikli araçlarda kullanılmak üzere batarya seçimi yapılmıştır. Belirlenen dört batarya arasından kriterler bazında en iyi batarya seçilmiştir. Batarya seçimi AHP, MOORA ve AHP- MOORA ağırlıklı çözümü yapılarak seçilmiştir. MOORA yönteminde referans ve oran metotları ile çözümü yapılmıştır. Beş yöntem ile çözüm sonucunda en iyi batarya Li-ion olarak belirlenmiştir. Sonuçların ilk tercihte birbirini desteklediği ancak diğer sıralarda değişikliklerin olduğu görülmektedir.

Tablo 12. Kriterlere Göre Sonuçlar

Alter.	AHP Çözümü		MOORA Çözümü				AHP Ağırlıklı MOORA Çözümü			
	Önem Ağırlığı	Sıra	Referans metodu		Oran Metodu		Referans metodu		Oran Metodu	
			Y*	Sıra	Y*	Sıra	Y*	Sıra	Y*	Sıra
Li-ion	0,462	1	0,571	1	3,540	1	0,036	1	0,620	1
Ni-MH	0,297	2	0,662	2	1,411	4	0,183	2	0,268	3
Ni-Cd	0,151	3	0,723	4	2,096	2	0,216	3	0,283	2
Pb-asit	0,087	4	0,716	3	2,093	3	0,241	4	0,256	4

6. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada elektrikli araçların tercihinde önemli faktörlerden biri olan batarya seçimi yapılmıştır. Seçim süreci için ÇKKV yöntemlerinden AHP ve MOORA yöntemleri ayrı ayrı ve bütünlük olarak uygulanmıştır. Ayrıca MOORA yöntemi kendi içinde referans noktası yaklaşımı ve oran metodu kullanılarak tercih sıralamaları yapılmıştır. Sonuçta Li-ion batarya en iyi alternatif olarak ön plana çıkmıştır. Her 4 yöntemde farklı sonuç sıralaması ortaya çıkmıştır; ancak beş yöntemde de Li-ion batarya birinci sırada yer almaktadır. Elektrikli araç üreticileri, her biçimlendirmeye göre en iyi, en ucuz, güvenilir, yüksek kapasiteli bataryayı seçmekte zorlanmaktadır. Elektrikli araçlar için batarya seçimi, bu yazıda ele alınmış ve batarya teknolojisinin seçimi metodolojisi önerilmiştir. EA uygulaması için ÇKKV kullanılarak yapılan uygulamada en iyi alternatif Li-ion teknolojisini seçmek olduğu görülmüştür. Li-ion pillerin elektrikli araçlarda baskın kullanım nedenleri; enerji verimliliği, daha uzun ömür ve diğer pillere kıyasla daha hızlı şarj oranıdır. Geliştirilen karar verme metodolojisi sadece batarya seçimi için yararlı değil aynı zamanda diğer çeşitli EA teknolojisinin uygulamaları içinde kullanılabilir.

Yapılan çalışma sonucunda en iyi batarya belirlenmiş olup, elektrikli araçlarda batarya seçim probleminde çözüm getirilmeye çalışılmıştır. Elektrikli araçlar ulaşımında alışlagelmiş yakıtlardan farklıdır. Elektrikli araçlarda birçok batarya çeşidi bulunmaktadır. ÇKKV yöntemleri kullanılarak en iyi batarya Li-ion batarya çıkmış olsa da diğer bataryalarda da olduğu gibi Li-ion batarya araştırma aşamasında gelişim göstermektedir. Elektrikli araçlara olan talebin düşük olmasının başlıca sebeplerinde biride bataryalardaki eksikliklerdir. Bataryaların ömrü, dayanıklılık, maliyet vb. gibi özellikleri gelişim gösterdiği sürece bu bataryalara olan ilgi artacaktır. Bunun beraberinde elektrikli araçlara olan talep de artış gösterecektir. Bataryalar ile şarj cihazları üzerinde de önemle durulması gereken bir konudur. Ayrıca şarj istasyonlarının yerlerinin seçimi veya belirlenmesi işlemlerinde de batarya teknolojileri ile uzatılmaya çalışılan araç menzillerine göre güncellenmeler yapılabilir.

Elektrikli araç satın alacak, tercihinde bulunacak kullanıcıların üzerinde durdukları kilit noktalardan biri batarya teknolojileridir. Dolayısıyla bu çalışma ile elektrikli araç satın alma süreçlerine etki edecek batarya teknolojilerinin değerlendirilmesinde kullanıcılara yardımcı olabilecek bir karar verme süreci sunulmuştur.

Büyük otomobil üreticileri de çeşitlenen batarya teknolojiler arasından seçim yapmak için ikileme karşı karşıya kalmaktadırlar. Tüm bu karmaşaya rağmen otomobil üreticileri batarya konusunda maliyet, güvenlik ve enerji depolama kapasitesi gibi çeşitli parametreler bakımından ürettikleri araçlar için doğru batarya teknolojisini tercih etmeleri gereklidir. Elektrikli araç konsepti üzerinde çalışan üreticiler için doğru batarya seçimi büyük bir öneme sahiptir. Bu çalışma ile elektrikli ve hibrid otomobil üreticilerinin de karar verme süreçleri için yararlanabilecekleri bir kaynak niteliğindedir. Ayrıca batarya teknolojilerinin, kullanıcıların beklentileri doğrultusunda karşılanabiliyor olması elektrikli araçlara olan talebin artmasını da tetikleyecektir.

Gelecek çalışmalarda, kullanılan kriterler tercihlere göre farklılık gösterebilir. Bunun için batarya seçerken istenen amaca uygun olup olmadığı konusunda uygun kriterler belirleyerek VIKOR-TOPSIS-PROMETHEE gibi diğer sıralama yöntemleri ve bütünlükli yöntemler kullanılabilir. Ayrıca kriterlerin birbirleri ile ilişkili olduğu durumlarda göz önünde bulundurularak ANP yöntemi ile seçim veya kriter önem ağırlıkları belirlenebilir. Ayrıca kullanıcı perspektifinden yaptığımız bu değerlendirme üretici firmalar tarafından da ortaya konulabilir. Ek olarak bu çalışmada akademisyen uzmanlardan yararlanılmıştır. Gelecek çalışmalarda otomobil mühendisliği alanında mühendis ve uzmanlardan da yararlanılarak grup karar verme uygulamaları gerçekleştirilebilir.

Referanslar

- Adıgüzel, O., (2009). Personel seçiminin analitik hiyerarşi prosesi yöntemiyle gerçekleştirilmesi, Dumlupınar Üniversitesi, Sosyal Bilimler Dergisi, 24, 243-251.
- Ahmadi, M., Mithulanathan, N., Sharma, R., (2016). A review on topologies for fast charging stations for electric vehicles, In International Conference on Power System Technology, IEEE,1-6.
- Aktaş, M., Baygüneş, B., Kıvrak, S., Çavuş, B., & Sözen, F. (2020) Elektrikli Araç İçin Düşük Maliyetli Bir Batarya Yönetim Sistemi Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 227-238.
- Battery University, “Retreaved, from http://batteryuniversity.com/learn/article/cost_of_power”, 07.30.2014.
- Bowkett, M., Thanapalan, K., Stockley, T., Hathway, M., Williams, J., (2013). Design and implementation of an optimal battery management system for hybrid electric vehicles, In international conference on automation and computing IEEE, 1-5.
- Brauers, W.K., Ginevičius, R., (2013). How to invest in belgian shares by MULTIMOORA optimization, Journal of business economics and management, 14, 5, 940-956.
- Brauers, W.K.M., Ginevicius, R., Podzevko, V., (2010). Regional development in lithuania considering by the MOORA method, Technological and economic development of economy, 16, 4, 613-640.
- Brauers, W.K.M., Zavadskas, E.K., (2006). The MOORA method and its application to privatization in a transition economy, Control and Cybernetics, 35, 2, 445-469.
- Bulach, W., Schuler, D., Sellin, G., (2018). Electric vehicle recycling 2020: key component power electronics, Waste management & research, 36, 4, 311.
- Cano, Z.P., Banham, D., Ye, S. , Hintennach, A., Lu, J., Fowler, M., Chen, Z., (2018). Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets, Nature Energy, 3, 4, 279.
- Cao, D., Leung, L, Law, J., (2008). Modifying inconsistent comparison matrix in analytic hierarchy process: A heuristic approach, Decision Support Systems, 44, 944-953.
- Chan, C.C., (2013). The rise & fall of electric vehicles in lessons learned, Proceedings of the IEEE, 206–212, 1828–1930.
- Çellek, S., (2013). Sinop-Gerze yöresinin heyelan duyarlılık analizi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çelen, A., & Kaba, M.Y. (2021). Elektrikli Araçlarda Kullanılan Silindirik Lityum İyon Bataryaların Soğutulmasının Parametrik İncelenmesi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 33(1), 49-61.
- Davutoğlu, O.I., Seçkin, G., Kalat, D.G., Yılmaz, T., Ersu, C.B., (2010). Speciation and implications of heavy metal content in surface sediments of Akyatan Lagoon-Turkey”. Desalination, 260(1-3),199-210.
- Debreceni, T., Balázs, GG., Varjasi, I., (2016). Elektrikli araçlar için misyon profili odaklı akü sistemleri tasarımı, Gelen yenilenebilir enerji uluslararası konferansı ve güç kalitesi, Madrid, İspanya.
- Demir, U., Aküner, M.C., (2018). Design and optimization of in-wheel asynchronous motor for electric vehicle, Gazi Universty, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture, 33, 4, 1517-1530.
- Demir, U., Aküner, M.C., (2018). Elektrikli bir araç için tekerlek içi asenkron motorun tasarım ve optimizasyonu, Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33, 4, 1517-1530.
- Deringöz, A., Danişan T. ve Eren T. (2021). Covid-19 takibinde giyilebilir sağlık teknolojilerinin ÇKKV yöntemleri ile değerlendirilmesi. Politeknik Dergisi, 1-1.
- Dey, B., Bairagi, B., Sarkar, B., Sanyal, S., (2012). MOORA based fuzzy multi-criteria decision making approach for supply chain strategy selection, International Journal of Industrial Engineering Computations, 3, 4, 649-662.
- Dikmen, İ.C., (2018). An overview of battery technologies. UEMK bildiri özetleri kitabı, 974.
- Diñç. S., Hamurcu, M. Ve Eren, T., (2018). Kırıkkale-kampüs dolmuş hattı etkinliğinin çok kriterli karar verme ile değerlendirilmesi. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9(Ek (Suppl.) 1), 238-247.
- Diñçer, H., Görener, A., (2011). Analitik Hiyerarşi Süreci ve Vikor tekniği ile dinamik performans: Bankacılık sektöründe bir uygulama, İstanbul Ticaret Üniversitesi, Sosyal Bilimler Dergisi, 19, 109-127.

- Elbir, T., Koca, H., (2013). Bir üniversite yerleşkesi içinde karayolu trafiğinden kaynaklanan hava kalitesinin belirlenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Hava Kirliliği Araştırmaları Dergisi, 2, 45-54.
- Erhan, K., Ayaz, M., Özdemir, E., (2013). Elektrikli araç şarj istasyonlarının güç kalitesi üzerine etkileri, Akıllı şebekeler ve Türkiye elektrik şebekesinin geleceği sempozyumu, Ankara, 26-27.
- Frieske, B., Kloetzke, M., Mauser, F., (2013). Trends in vehicle concept and key technology development for hybrid and battery electric vehicles, World Electric Vehicle Symposium and Exhibition EVS27 IEEE, 1-12.
- Garcia-Cascales, M., Lamata, M., (2009). Selection of a cleaning system for engine maintenance based on the analytic hierarchy process, Computers & Industrial Engineering, 56, 1442-1451.
- Gavcar, E., & Kara, N. (2020). Elektrikli Otomobil Seçiminde Entropi ve TOPSIS Yöntemlerinin Uygulanması. İş ve İnsan Dergisi, 7(2), 351-359.
- Gears educational system, (2014). Battey basics: research, test, measure, analyze and select the optimal battery, Retrieved July 30.
- Gören, E.(2011). Hibrid ve elektrikli araçlar ile toplu ulaşımda enerji verimliliği.
- Guo, S., Zhao, H., (2015). Optimal site selection of electric vehicle charging station by using fuzzy TOPSIS based on sustainability perspective, Applied Energy, 158, 390-402.
- Güner, C. (2013). Dışarıdan şarj edilebilen hibrit elektrikli araç ile menzil artırıcı elektrikli araç konseptlerinin karşılaştırmalı analizi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Güner, H., (2005). Bulanık AHP ve bir işletme için tedarikçi seçimi problemine uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Güven, F., Rende, H., (2017). Elektrikli Araçların Tasarımında Malzeme Seçiminin Önemi, Engineer & the Machinery Magazine, 58, 689, 81-95.
- Gür, Ş., Hamurcu, M. ve Eren, T. (2017). Ankara’da Monoray projelerinin analitik hiyerarşi prosesi ve 0-1 hedef programlama yöntemleri ile seçimi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(4), 437-443.
- Hamurcu, M., Eren, T., (2018). Yüksek kapasiteli elektrikli otobüslerin seçiminde hibrit çok kriterli karar verme uygulaması”, Transist 11. Uluslararası Ulaşım Teknolojileri Sempozyumu ve Fuarı, 1-10.
- Hamurcu, M., Eren, T., (2020). Electric Bus Selection with Multicriteria Decision Analysis for Green Transportation, Sustainability, 12 (7), 2777, 2020.
- Hamurcu, M., & Eren, T. (2017). Raylı sistem projeleri kararında AHS-HP ve AAS-HP kombinasyonu. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD), 3(3), 1-13.
- Hamurcu, M., Alağaç, H. M., ve Eren, T. (2017). Selection of rail system projects with analytic hierarchy process and goal programming. Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 8(2), 291-302.
- Hofman, T., Dai, C.H., (2010). Energy efficiency analysis and comparison of transmission technologies for an electric vehicle, In vehicle power and propulsion conference IEE, 1-6, 2010,
- Huo, H, Cai, H., Zhang, Q., Liu, F., He, K., (2015). Life-cycle assessment of greenhouse gas and air emissions of electric vehicles, A comparison between China and the US. Atmos Environ, 108, 107–116.
- Huo, H., Cai, H., Zhang, Q., Liu, F., He, K., (2015). Life-cycle assessment of greenhouse gas and air emissions of electric vehicles, A comparison between China and the US. Atmos Environ, 108, 107–116.
- Kaymaz, H., & Demir, M.F.(2020). Elektrikli Otomobiller için Çekiş Motor Tip Seçimi. International Periodical of Recent Technologies in Applied Engineering, 2(1), 35-41.
- Kecek, G., Yüksel, R., (2016). Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve Promethee teknikleriyle akıllı telefon seçimi, Dumlupınar Üniversitesi, Sosyal Bilimler Dergisi, 49, 46-62.
- Kerem, A., (2014). Elektrikli araç teknolojisinin gelişimi ve gelecek beklentileri, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5, 1, 1-13.
- Khaligh, A., Zhihao, L., (2010). Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art, Vehicular technology IEEE transactions on, 59, 6, 2806-2814.

- Kılıncı, Ö., Önal, S.A., (2011). Fuzzy AHP Approach for supplier selection in a washing machine company, Expert systems with applications, 38, 9656–9664.
- Mandal, U.K., Sarkar, B., (2012). Selection of best Intelligent Manufacturing System (IMS) under fuzzy MOORA conflicting MCDM environment, Int J Emerg Technol Adv Eng 2, 9, 301–310.
- Manzetti, S., Mariasiu, F., (2015). Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 51, 1004-1012.
- Ogura, K., Kolhe, M.L., (2017). Battery technologies for electric vehicles. In Electric Vehicles: Prospects and Challenges, 139-167.
- Ordonez, J., Gago, E.J., Girard, A., (2016). Processes and technologies for the recycling and recovery of spent lithium-ion batteries, Renewable & sustainable energy reviews, vol. 60pp, 195–205.
- Ömürbek, N., Üstündağ, S., Helvacıoğlu, Ö.C., (2013). Kuruluş yeri seçiminde Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) kullanımı: Isparta Bölgesi'nde bir uygulama, Yönetim Bilimleri Dergisi, 11, 21, 101-116.
- Özdağoğlu, A., (2014). Normalizasyon yöntemlerinin çok ölçütlü karar verme sürecine etkisi–MOORA yöntemi incelemesi, Ege Akademik Bakış Dergisi, 14, 2, 283-294.
- Özkop, E. (2013). Elektrikli araçlar için şarj cihazı.
- Öztürk, Z., (2018). İstanbul'da karayolu yolcu taşımacılığında elektrikli araç kullanımının incelenmesi, El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 5, 2, 367-386.
- Palaz, H., Kovacı, A., (2008). Türk Deniz Kuvvetleri denizaltılarının seçiminin AHP ile değerlendirilmesi, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, 3, 53-60.
- Parks, K., Denholm, P., Markel, T., (2007). Costs and emissions associated with plug-in hybrid electric vehicle charging in the xcel energy colorado service territory, Contract National renewable energy laboratory, USA, 640-41410.
- Raslavicius, L., Azzopardi, B., Keršys, A., Starevicius, M., Bazaras, Z., (2015). Makaras, R. electric vehicles challenges and opportunities: Lithuanian review, Renew sustain energy rev. 42, 786–800.
- Raslavicius, L., Starevicius, M., Keršys, A., Pilkauskas, K., Vilkauskas, A., (2013). Performance of an all-electric vehicle under UN ECE R101 test conditions, A feasibility study for the city of Kaunas Lithuania Energy, 55, 436–448.
- Saaty., T.L., (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process, European journal of operational research, 48, 9-26.
- San, R., Momber, T.G., Abbad, M.R., Miralles, A.S., (2011). Regulatory framework and business models for charging plug-in electric vehicles: Infrastructure, agents, and commercial relationships, Energy policy, 39, 10, 6360-6375.
- Sarı Kurt, T., Balıkcı, A., (2017). Tam elektrikli araçlar için özgün bir enerji yönetim sistemi uygulaması, Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32, 2, 323-333.
- Satılmış, O., Meşe, E., (2011). Elektrikli ve hibrit elektrikli araçlar için batarya şarj cihazları.
- Sayın, A.A., Yüksel, İ., (2011). Elektrikli aracın, lityum-iyon bataryasının modellenmesi ve batarya yönetimi, Mühendis ve Makine, 52, 616, 75-82.
- Sierzchula, W., Bakker, S., Maat, K., (2014). Van Wee, B. The influence of financial incentives and other socio-economic factors on electric vehicle adoption, Energy policy, 68, 183–194.
- Solera, L., (2001). Nonconventional on-board charger for electric vehicle propulsion batteries, Vehicular Technology IEEE Transactions on, 50, 144-149.
- Sun, B., Sun, X., Tsang, D. H., & Whitt, W. (2019). Optimal battery purchasing and charging strategy at electric vehicle battery swap stations. European Journal of Operational Research, 279(2), 524-539.
- Tarлак, H., İşen, E. (2018). Elektrikli Araçlar ve Akü Şarj Sistemleri, 4-1, 124-141.
- Taş, M., Özlemiş, Ş. N., Hamurcu, M., ve Eren, T. (2017). Ankara'da AHP ve PROMETHEE yaklaşımıyla monoray hat tipinin belirlenmesi. Ekonomi İşletme Siyaset ve Uluslararası İlişkiler Dergisi, 3(1), 65-89.
- TEHAD, (2021). 2021 yılı ilk çeyreğinde, Elektrikli ve Hibrid araç satışları arttı | TEHAD (Erişim tarihi:01.06.2021)
- Tunca, M.Z., Aksoy, E., Bülbül, H., Ömürbek, N., (2015). AHP temelli TOPSIS ve ELECTRE yöntemleri ile muhasebe paket programı seçimi, Ömer Halisdemir Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi dergisi, 8, 1, 53-71.

Tuncay, R.N., Üstün, Ö., (2004). Otomotiv elektroniğindeki gelişmeler, 2004.

Uçarol, H., Kural, E., Bahar, D.M., Özsu, E., Elcik, E., Çimen, M.A., Kütük, O.,(2014). Hibrid ve elektrikli araçlar ulaşımında enerji verimliliği için bir alternatif”, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, Enerji Enstitüsü, 2014.

Ustabaş, A.,(2014). Mikro ve makro etkileri yönünden elektrikli otomobiller (Türkiye ekonomisi örneği), xxxvi, 1, 269-291.

Vatansever, K., Uluköy, M., (2013). Kurumsal kaynak planlaması sistemlerinin bulanık AHP ve bulanık MOORA yöntemleriyle seçimi: Üretim sektöründe bir uygulama, Celal Bayar Üniversitesi, Sosyal Bilimler Dergisi, 11, 2, 274-293.

Von, D.P., Rosenstiel, D.F., Heuermann, S., Hüsigg, S., (2015). Why has the introduction of natural gas vehicles failed in Germany, Lessons on the role of market failure in markets for alternative fuel vehicles. Energy policy, 78, 91–101.

Vu, H., Tran, N., Choi, W., (2013). A novel hybrid soft switching full-bridge PWM and full-bridge LLC converter for on-board battery charger applications, In international power electronics and motion control conference (IPEMC-ECCE Asia) 2016 IEEE 8th, 2470-2473.

Xiong, R., Cao, J., Yu, Q., (2018). Reinforcement learning-based real-time power management for hybrid energy storage system in the plug-in hybrid electric vehicle, Applied Energy, 211, 538-548.

Yazıcı, V., Özdemir, E. (2013). Elektrikli araç şarj yöntemleri.

Yıldırım, B.F., (2015). Çok kriterli karar verme problemlerinde ARAS yöntemi, Kafkas University, Faculty of economics and administrative sciences journal, 6, 9, 285.

Yılmaz, B., Dağdeviren, M., (2010). Ekipman seçimi probleminde Promethee ve Bulanık Promethee yöntemlerinin karşılaştırmalı analizi, Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 25, 4, 811-826.

Yong, J.Y., (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects, Renewable and sustainable energy reviews 49, 365-385.



Usage of Waste Water Treatment Plants Hydroelectric Energy for Urban Lighting Energy: The Case of Turkey

Burhan Baran¹

¹Department of Electrical and Electronic Engineering, Inonu University, Malatya, TURKEY

Başyuru/Received: 21/04/2021

Kabul / Accepted: 10/06/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 18/06/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Abstract

In this study, primarily from wastewater treatment plants in seven geographical regions in Turkey value of electrical power that can be generated were calculated. Then, a study was carried out to determine the ratio of the electrical power generated to meet the lighting energy requirement in the relevant geographical region. For this purpose, a method for evaluating the hydroelectric potential of wastewater treatment plant was presented. For seven geographical regions, population prediction in 2018-2025, predicted flow rate of wastewater to be treated from wastewater treatment plant and lighting consumption for each region were predicted. Predictions for the future years were made by using the equations obtained through the curve fitting algorithm written in Matlab environment. Using these values, the predicted electrical power values were calculated in case the distance between the treated wastewater falls and the turbine where electricity generation took place was 3 meters. According to study total predicted wastewater would be 4.16 (2018) and 5.89 (2025) billion m³. Total cities' predicted lighting energy consumption in Turkey would be 4429.2 GWh (2018) and 4941.5 GWh (2025). And yearly predicted electricity generation from wastewater treatment plant hydroelectric would be 28.51 GWh (2018) and 38.53 GWh (2025).

Key Words

"Distributed Generation, Lighting Energy, Micro Hydroelectric, Waste Water"

1. Introduction

Global demand for electrical energy is constantly increasing. The trend in the world is that the demand for electrical energy in developing countries is increasing faster than supply (Nimje and Dhanjode, 2015). The main reasons for the increase in demand faster than supply can be shown as population growth, climate change, economic development and increasing electricity energy deficit. In order to meet this energy deficit, it may be possible to provide renewable energy sources such as wind, solar, biomass and hydro, which are free and abundant in nature. In the hydrological cycle, atmospheric water reaches the earth's surface as precipitation. Besides the water resources, the water supplied from the clean water sources are discharged as domestic wastewater after being used for humanistic needs (Hydroelectric-4, 2019, Baran, 2019).

There are two types of energy in running water. One is kinetic energy, the other is potential energy. Depending on the type of hydraulic plants, one of these two energy types is used to generate electricity. The incoming water falls on the blades of the turbine which can make the rotation. Electrical energy is generated by rotating the electric generators where the shaft of the turbine is generated. The generated electrical energy is then transmitted to the transformers to be connected to the main grid (Hydroelectric-3, 2019). Hydroelectric power plants are classified according to the size of the electrical power they generate. Large power plants can generate between 30 MW and 100 MW. Small hydroelectric plants can generate power between 100 kW to 1 MW. Moreover, micro-hydroelectric power plants can generate electricity between 5 kW and 100 kW. The smallest hydropower plants are pico-hydropower plants capable of generating a maximum of 5 kW (Yah et al., 2017). Micro-hydroelectric turbines are generally used in the generation of electricity from the discharged wastewater of wastewater treatment plants.

Numerous works associated with hydroelectric from wastewater treatment plant. A study by Bousquet et al. (2017) had presented a method to assess the hydroelectric potential of wastewater treatment plants. They had developed a two-step algorithm. The first stage included the prediction of the annual electricity consumption in the selected region and the second stage the studies on the feasibility of each plan considering the investment costs and local electricity sales. At the end of the study, nineteen regions with a total of 9.3 GWh/year energy generation potential were identified. Ak et al. (2017) had aimed to find the most suitable sustainable hydroelectric technology. A total of six criteria were evaluated, including investment cost, repayment period, power generation performance, construction time and ventilation capacity. With the fuzzy logic tool, the satisfaction of each criterion was estimated separately. In the study had conducted by Gu et al. (2017) energy consumption and recovery in wastewater treatment plants were analyzed. The differences between the self-sufficiency of the energy generated in wastewater treatment plants in different regions around the world and the current energy consumption were analyzed. In the study had conducted by Zhou et al. (2017) potential regions, turbine selection and project costs for very low head energy sources were investigated. The performance of a newly designed micro-hydroelectric system for wastewater treatment plants with large fluctuations in flow was measured by Chae et al. (2015) As a result of the test, it was found that the new system obtained 1.78-22.80 times more electricity at both flow rate and net height. In the study had conducted by Power et al. (2014) an evaluation method was developed to estimate the potential power outputs and the payback times of the hydroelectric energy recovery programs. A sensitivity analysis was performed to demonstrate the effect of changes in current, turbine selection and electricity prices on power output. In the study had conducted by Kose et al. (2013) a hybrid system consisting of wind and hydroelectric power plants was analyzed to meet the energy demand of Konya water treatment plant. In addition to 250 kW HEPP and 250 kW WPP, two 250 kW or one 500 kW wind turbines were added to the HEPP in order to meet the electrical energy requirements of the Konya water treatment plant. In this case, the energy demand of the power plant could be met with HEPP for 10 months per year. It had concluded that a WPP was required to provide uninterrupted energy. In the study conducted by Frijns et al. (2013) municipal wastewater was evaluated as a source of chemical energy. A study was conducted by Kollmann et al. (2017) on the supply of surplus energy in wastewater treatment plants to the main distribution network to supply to external consumers. Tamrakar et al. (2015) had conducted a study on the applicability of micro hydroelectric power plant to domestic needs. With the simulations, suggestions had been made regarding the applicability of small hydroelectric power plants to domestic. Berger et al. (2013) had conducted a study on the constraints that should be taken into account, especially for small hydropower plants for energy recovery and storage of energy. The results had showed that some sewer structures may be suitable for energy recovery. In a study by Abbas et al. (2018) a study was conducted to assess how much savings would be achieved if a hydro turbine was used in a wastewater treatment plant. For this purpose, a computational fluid dynamics software was applied. As a result, savings were estimated to be 1,564 MWh/year.

In this study, considering all wastewater treatment plants in Turkey, a study had been made with the energy that could be obtained from these meets the lighting energy demand of all cities. Firstly, predicted amount of electrical energy that could be derived from wastewater treatment plants located in seven geographical regions of Turkey were calculated. Then, the predicted amounts of electricity consumed in the province lighting in the same regions were calculated. A prediction study was carried out on the extent to which this generation would meet the demand energy of the province lighting. For this purpose, population, treated wastewater amount and consumed lighting energy values for each region up to 2018 were obtained from Turkey Statistical Institute (TUIK) and Republic of Turkey Energy Market Regulatory Authority (EPDK). These data until 2025 were predicted by using curve fitting program written in Matlab environment. According to these flow rates, the total micro-hydroelectric energy values which could be generated from wastewater treatment plants with a height of 3 meters were calculated. By using these predicted values, the ratio of micro-hydroelectric generation obtained from wastewater treatment plants to province lighting electricity consumption was calculated for each region. In this study, unlike other studies, the curve fitting method written in Matlab environment was used to obtain predicted values of population, treated wastewater and lighting energy consumption parameters. In addition, a study was conducted on the use of electrical

energy to be obtained from treated wastewater in urban lighting. The wastewater from wastewater treatment plants is generally discharged directly to the receiving environment without being used for any other purpose. With this study, it was thought that this wastewater, which was discharged into the receiving environment, would guide local administrations in terms of giving an idea about the use of lighting energy of cities.

The next part of the study after this stage consists of four parts. The second section is the materials and method section. In this section, curve fitting method was explained. Predicting of population, treated wastewater and lighting consumption energy were made for seven geographic regions. The third section is the results and discussion section, and the electrical energy calculations that could be generated from wastewater had been made for 3 meters head height. In addition, the ratio of these energies to meet the lighting energy consumption of each region had been predicted. In the conclusion section, the results obtained in the study were compared.

2. Materials and Method

2.1. Curve Fitting

The data generated in experimental studies are generally point-based. A continuous function cannot be obtained. In this case the data is given as point pairs with $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$. Curve fitting is the function that gives the least incorrect curve in distance to the current values (Curve Fitting, 2018). This method is intended to find an appropriate curve equation that best represents the relationship between the two variables. In this study, polynomial equations were obtained by using the curve fitting algorithm which was written in Matlab environment and using the current population (2007-2018), the amount of treated wastewater (2001-2016) and lighting energy consumption values (2000-2017) of seven geographical regions has taken from TUIK (TUIK, 2019). With these equations, predictions were made between 2018 and 2025 of population, consumption of wastewater and lighting energy consumption values. The general steps of the program in Matlab environment for obtaining the predicted values were as Figure 1:

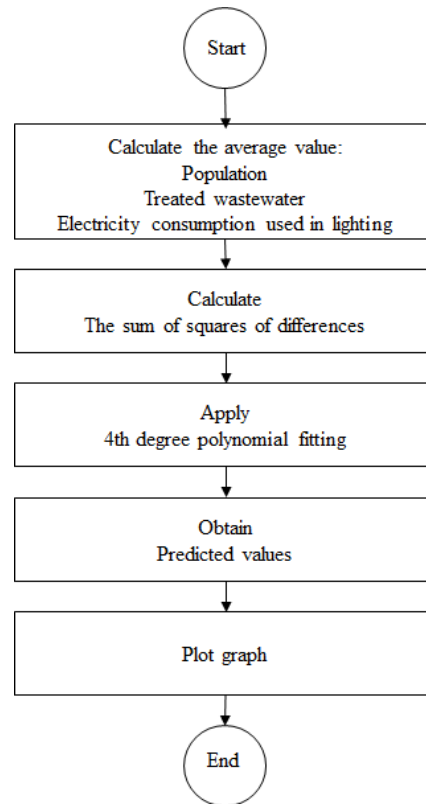


Figure 1. Flowchart used to obtain predicted values

2.2. Population

Turkey has seven geographical regions. When the first part of population values (2007-2018) in Table 2 were entered into the curve fitting algorithm created in Matlab environment for seven geographic regions, the graphs were obtained as in Figure 2.

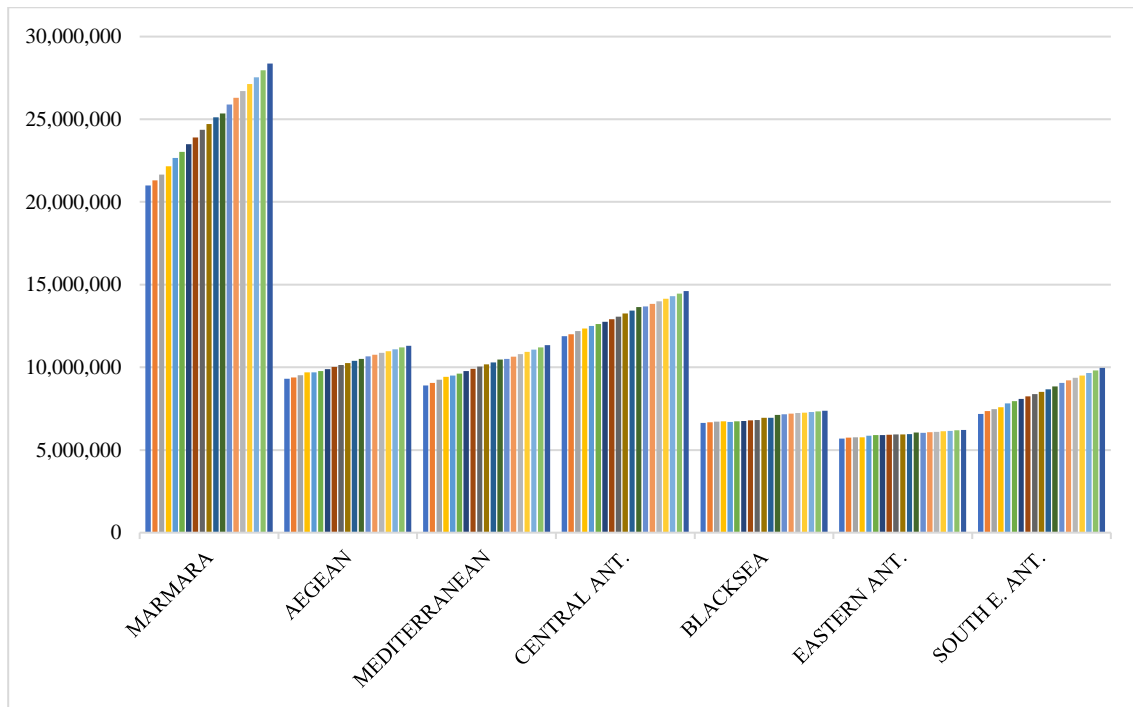


Figure 2. Population results of curve fitting for seven geographic region

Population equations by year for each region and the R-squared values obtained were as in Table 1.

Table 1. Population equations by year for each region and the R-squared values

Region	Population Equation (by year)	R-square
Marmara	$4.149 \times 10^5 \times \text{year} - 8.118 \times 10^8$	0.9974
Aegean	$1.082 \times 10^5 \times \text{year} - 2.078 \times 10^8$	0.9915
Mediterranean	$1.376 \times 10^5 \times \text{year} - 2.673 \times 10^8$	0.9968
Central Anatolian	$1.565 \times 10^5 \times \text{year} - 3.023 \times 10^8$	0.9965
Black Sea	$3.530 \times 10^4 \times \text{year} - 6.411 \times 10^7$	0.8107
East Anatolian	$2.878 \times 10^4 \times \text{year} - 5.206 \times 10^7$	0.9317
Southeast Anatolian	$1.504 \times 10^5 \times \text{year} - 2.946 \times 10^8$	0.9982

By using these equations, when the population predicts were made between 2019 and 2025 for each region separately, the values in the second part (2019-2025) of Table 2 were obtained. While values between 2007 and 2018 were the current population values, the values between 2019 and 2025 were predicted population values.

Table 2. Current and predicted population values of seven geographic regions between 2007 and 2025 (TUIK, 2019)

Years	Marmara	Aegean	Mediterranean	Central Anatolian	Black Sea	Eastern Anatolian	South Eastern Anatolian	Turkey
2007	20995367	9299322	8906427	11877503	6642206	5694582	7170849	70586256
2008	21313665	9384848	9050691	12004736	6668165	5744243	7350752	71517100
2009	21655690	9517153	9252902	12187872	6723050	5761752	7462893	72561312
2010	22158568	9693594	9423231	12346517	6733081	5775225	7592772	73722988

Table 2 (cont.). Current and predicted population values of seven geographic regions between 2007 and 2025 (TUIK, 2019)

Years	Marmara	Aegean	Mediterranean	Central Anatolian	Black Sea	Eastern Anatolian	South Eastern Anatolian	Turkey
2011	22663679	9687692	9495788	12500220	6697209	5863508	7816173	74724269
2012	23024533	9779502	9611007	12610403	6736786	5906680	7958473	75627384
2013	23486223	9897313	9766093	12758430	6756889	5906564	8096352	76667864
2014	23892868	10023549	9906771	12908583	6785785	5927630	8250718	77695904
2015	24357131	10138132	10039939	13070497	6808188	5941626	8385540	78741053
2016	24715319	10265111	10182776	13258256	6945732	5938790	8508887	79814871
2017	25119207	10383963	10303984	13424410	6951130	5962666	8665165	80810525
2018	25346380	10514200	10461409	13650496	7124918	6058499	8847980	82003882
2019	25883100	10655800	10514400	13673500	7160700	6046820	9057600	82991920
2020	26298000	10764000	10652000	13830000	7196000	6075600	9208000	84023600
2021	26712900	10872200	10789600	13986500	7231300	6104380	9358400	85055280
2022	27127800	10980400	10927200	14143000	7266600	6133160	9508800	86086960
2023	27542700	11088600	11064800	14299500	7301900	6161940	9659200	87118640
2024	27957600	11196800	11202400	14456000	7337200	6190720	9809600	88150320
2025	28372500	11305000	11340000	14612500	7372500	6219500	9960000	89182000

According to the data in Table 2, the population growth rate from 2018 to 2025 had been predicted 11.94% in Marmara Region, 7.52% in Aegean Region, 8.40% in Mediterranean Region, 7.05% in Central Anatolia Region, 3.48% in Black Sea Region, 2.66% in Eastern Anatolia Region and 12.57% in Southeast Anatolia Region and the lowest population growth rate would be in Eastern Anatolia Region.

2.3. Treated Wastewater

Similarly, when the first part of wastewater values (2001-2016) in Table 4 were entered into the curve fitting algorithm created in Matlab environment for seven geographic regions, the graphs, polynomial equations and R-square values for each region were obtained as in Figure 3.

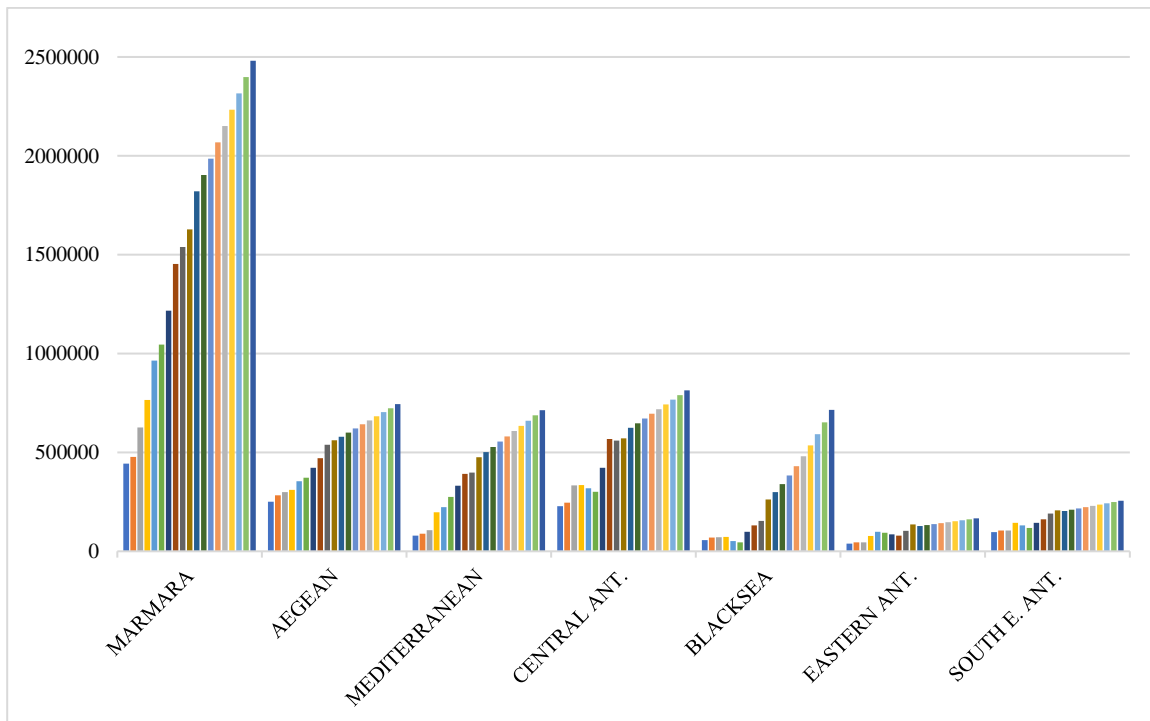


Figure 3. Treated wastewater results of curve fitting for seven geographic region

Treated wastewater equations by year for each region and the R-squared values obtained were as in Table 3.

Table 3. Treated wastewater equations by year for each region and the R-squared values

Region	Treated Wastewater Equation (by year)	R-square
Marmara	$8.241 \times 10^4 \times \text{year} - 1.644 \times 10^8$	0.9819
Aegean	$2.058 \times 10^4 \times \text{year} - 4.093 \times 10^7$	0.9874
Mediterranean	$2.655 \times 10^4 \times \text{year} - 5.305 \times 10^7$	0.9782
Central Anatolian	$2.375 \times 10^4 \times \text{year} - 4.728 \times 10^7$	0.8678
Black Sea	$1641 \times (\text{year})^2 - 6.581 \times 10^6 \times \text{year} + 6598114482$	0.9377
East Anatolian	$5002 \times \text{year} - 9.962 \times 10^6$	0.7482
Southeast Anatolian	$6566 \times \text{year} - 1.304 \times 10^7$	0.8520

Predictions of treated wastewater from Turkey's seven geographical regions of the 2017-2025 year has been made. While making these predicts, the equations in Figure 3 were used. The values obtained were as in Table 4. While the values between 2001 and 2016 indicate the current treated wastewater values, the values between 2017 and 2025 indicate the wastewater values to be predicted.

Table 4. Current and predicted flow rates (thousand m³/year) (TUIK, 2019)

Years	Marmara	Aegean	Mediterranean	Central Anatolian	Black Sea	Eastern Anatolian	South Eastern Anatolian
2001	443997	250993	78701	227225	56608	39177	97274
2002	476610	282251	88961	246079	69162	44468	104848
2003	626858	299112	106530	332655	71339	45094	104962
2004	765502	310584	196587	335317	71895	76831	144324
2006	964083	353837	223859	318654	51650	98113	130299
2008	1045657	372746	275318	301054	45722	93218	117866
2010	1216165	422409	330865	422770	97791	85251	143900
2012	1452853	471096	392296	568683	130831	79885	161336
2014	1539042	539509	397308	560458	153019	102859	191592
2016	1627680	562034	475663	571314	262578	135643	207437
2017	1820970	579860	501350	623750	299731	127034	203622
2018	1903380	600440	527900	647500	340166	132036	210188
2019	1985790	621020	554450	671250	383883	137038	216754
2020	2068200	641600	581000	695000	430882	142040	223320
2021	2150610	662180	607550	718750	481163	147042	229886
2022	2233020	682760	634100	742500	534726	152044	236452
2023	2315430	703340	660650	766250	591571	157046	243018
2024	2397840	723920	687200	790000	651698	162048	249584
2025	2480250	744500	713750	813750	715107	167050	256150

When Table 4 was analyzed, the predicted increase rate in the amount of wastewater treated from 2016 to 2025 could be seen. The predicted increase rates were as 52.38% in Marmara Region, 32.47% in Aegean Region, 50.05% in Mediterranean Region, 42.44% in Central Anatolia, 172.34% in Black Sea Region, 23.15% in Eastern Anatolia Region and 23.48% in Southeast Anatolia Region. The highest increase in the amount of wastewater was predicted to be in the Black Sea region and the lowest increase rate of wastewater would be in the Eastern Anatolia Region. When Table 2 and Table 4 were compared, it had seen that the increase in the amount of wastewater to be treated would increase to a very high value of 172.34% in 2025 in the Black Sea Region. It was observed that the rate of increase in population growth rate and the increase in the amount of wastewater to be increased in Eastern Anatolia Region had the lowest rate among the seven geographical regions. In addition, the rate of increase in the amount of treated wastewater would be much higher than the population growth rate in all regions. The equations of prediction of the wastewater amounts to be treated according to

the population of seven geographical regions between 2018 and 2025 were obtained as at Table 5 with the curve fitting algorithm applied in Matlab environment. In these equations, *TWW* stands for Treated Wastewater (thousand m³) and *P* stands for population.

Table 5. Treated wastewater equations by population for each region and the R-squared values

Region	Treated Wastewater Equation (by population)
Marmara	$193.7 \times \text{population} - 3.019 \times 10^9$
Aegean	$0.1852 \times \text{population} - 1.35 \times 10^6$
Mediterranean	$0.2022 \times \text{population} - 1.577 \times 10^6$
Central Anatolian	$0.1615 \times \text{population} - 1.543 \times 10^6$
Black Sea	$1.516 \times \text{population} - 1.047 \times 10^7$
East Anatolian	$0.1902 \times \text{population} - 1.015 \times 10^6$
Southeast Anatolian	$0.04218 \times \text{population} - 1.645 \times 10^5$

2.4. Lighting Consumption Energy

Lighting is the applied light to see the objects in a region and the environment of these objects. Lighting in cities is of great importance. The biggest aim of lighting in the cities is to make streets bright. Besides, the fact that a province is bright at night allows the values such as the historical monuments belonging to that province to be visible at night. The energy used for lighting purposes in Turkey corresponds to 2.62 % of the total electrical energy consumed. This ratio had been obtained from the average of the energy consumption percentages (TUIK, 2019) of 48 years between 1970 and 2017. Considering the lighting consumption data the years 2000 and 2017 (TUIK, 2019), total consumption values between 2018 and 2025 were obtained by using curve fitting algorithm written in Matlab environment. This curve was a curve of total electricity consumption in Turkey. The graph showing this curve was as in Figure 4. In the resulting polynomial equation, the R-square value was 0.9874 and the equation was “Lighting Energy Consumption = $8791 * \text{year} - 1,749 * 10^7$ ”.

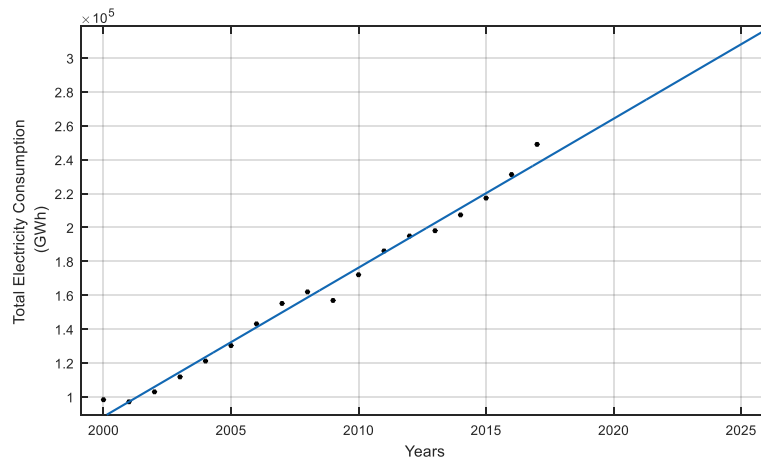


Figure 4. Total electricity consumption (Turkey)

Figure 4 shows the values of total electricity consumption in Turkey. However, in this study, it is necessary to find out how much electricity is consumed for lighting purposes. For this, the percentages rate of the data in Table 6 were used. In order to find out how much of the total electrical energy consumed between 2018 and 2025 was used in lighting, “Forecast Sheet” application in Excel was used. Percentiles of the years 2018-2025 have been found through this application. The energy consumed with the aim of lighting between the years 2018 and 2025 was found by the ratio of total consumed energies to these percentages. However, in this study, it was necessary to rate the total lighting energies according to regions as seven geographical regions were studied.

Table 6. Total consumed electrical energy values and electrical energy values consumed with the purpose of lighting (TUIK, 2019)

Year	Total Consumption (GWh)	Lighting Consumption Percentage (%)	Lighting Consumption (MWh)	Year	Total Consumption (GWh)	Lighting Consumption Percentage (%)	Lighting Consumption (MWh)
2000	98296	4.6	4521616	2013	198045	1.9	3762855
2001	97070	5.0	4853500	2014	207375	1.9	3940125
2002	102948	5.0	5147400	2015	217312	1.9	4128928
2003	111766	4.5	5029470	2016	231204	1.8	4161667
2004	121142	3.7	4482254	2017	249023	1.8	4482407
2005	130263	3.2	4168416	2018	250238	1.8	4429213
2006	143071	2.8	4005988	2019	259029	1.7	4507105
2007	155135	2.6	4033510	2020	267820	1.7	4579722
2008	161948	2.5	4048700	2021	276611	1.7	4647065
2009	156894	2.5	3922350	2022	285402	1.7	4709133
2010	172051	2.2	3785122	2023	294193	1.6	4765927
2011	186100	2.1	3908100	2024	302984	1.6	4817446
2012	194923	2.0	3898460	2025	311775	1.6	4863690

Then, consumption values of each province were obtained as percentage using lighting consumption data covering three years (2015-2017) of 81 cities from EPDK Electricity Market Development Reports (EPDK, 2019). For each province, the lighting consumption amounts between 2018 and 2025 were calculated using these lighting consumption percentages. The “Forecast Sheet” application was also used in Excel. The values obtained in Table 6 were applied to the provinces and the lighting consumption values of the 81 provinces between 2018 and 2025 were found. Then, energy consumption values of the cities in each geographical region were collected and total energy consumption of the regions were obtained. At the end of these studies, the current (2015-2017) and predicted (2018-2025) lighting energy consumption values obtained for the seven geographical regions were as in Table 7.

Table 7. Current and predicted lighting energy consumption values between 2015 and 2025 (EPDK, 2019)

Region/Year	Current Lighting Consumption (MWh)			Predicted Lighting Consumption (MWh)							
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Marmara	1001421.9	1030397.2	1025983.7	1043965.5	1054275	1062953	1070219	1075632	1079959	1082962	1084603
Aegean	874784.5	608821.2	635201.0	634263.3	634212.8	632917.6	635253.8	632031.6	627672.6	632048,9	660002.7
Mediterranean	482066.8	554401.9	527757.5	553208.7	568859.8	584372.5	599006.7	613666.0	627672.6	640720.3	653679.9
Central Anatolia	817509.3	823669.7	849513.4	859710.2	868582.2	876100.8	882477.6	887737.5	891704.9	894599.7	896378.1
Black Sea	659570.4	667570.5	681238.3	683870.5	685143.1	689248.2	692877.4	695134.0	682480.7	688894.8	696966.8
Eastern Anatolia	268202.7	265391.2	308506.3	306058.6	308799.8	311421.1	313212.2	315106.9	315981.0	316987.9	317112.6
South Eastern Anatolia	205919.7	267963.4	309047.3	348136.1	387223.4	427288.1	467959.4	508652.3	549988.0	591582.4	632766.1

When Table 7 was examined, it has been see that the highest energy consumption was in Marmara Region and the lowest in Eastern Anatolia Region. When 2017 year compared with 2025 year, it has been see that the lighting energy consumption increased as 5.71% in the Marmara Region, 3.9% in the Aegean Region, 23.86% in the Mediterranean Region, 5.52% in the Central Anatolia Region, 2.31% in the Black Sea Region, 2.79% in the Eastern Anatolia Region and 104.75% in the Southeastern Anatolia Region. The lowest lighting consumption energy prediction was realized in the Black Sea Region. When Table 2 and Table 7 were compared, it has been see that the amount of lighting energy consumption lags behind population growth rate in Marmara, Aegean, Central Anatolia and Black Sea Regions. In the Mediterranean, Eastern Anatolia and Southeastern Anatolia Regions, it has been see that lighting energy consumption rates were obtained at rates above the population increase. The equations of prediction of the lighting consumption

amounts of the seven geographical regions between the years 2018 and 2025 were obtained as at the Table 8 with the curve fitting algorithm applied in Matlab environment. In these equations, *IEC* stands for Lighting Energy Consumption (MWh) and *P* stands for Population.

Table 8. Lighting consumption energy equations for each region by population

Region	Lighting Consumption Energy (by population)
Marmara	$0.01363 \times \text{population} + 7.025 \times 10^5$
Aegean	$0.01582 \times \text{population} + 4.632 \times 10^5$
Mediterranean	$0.1092 \times \text{population} - 5.823 \times 10^5$
Central Anatolian	$0.0349 \times \text{population} + 3.907 \times 10^5$
Black Sea	$0.03214 \times \text{population} + 4.564 \times 10^5$
East Anatolian	$0.05851 \times \text{population} + 4.524 \times 10^4$
Southeast Anatolian	$0.2617 \times \text{population} - 1.978 \times 10^6$

2.5. Hydroelectric Generation

Hydropower is the force generated by the movement of water bodies. There must be three things to generate hydropower. These are flowing water, hydraulic turbines and generators. The hydraulic turbine converts the energy of flowing water into mechanical energy by turning the impeller of the hydraulic turbine connected to a generator. The generator converts this mechanical energy into electrical energy. When a magnet passes through a conductor, it causes the flow of electrons. Thus, electricity generation is realized. In a large generator, electromagnets are formed by circulating direct current through wire rings wrapped around magnetic steel lamination stacks known as field posts. When the rotor rotates, it causes the field poles to cross the conductors mounted on the stator. This leads to electrical output and voltage to the generator output terminals (Hydroelectric-1, 2019, Hydroelectric-2, 2019). The natural technical, economic and environmental benefits of hydroelectric energy are thought to make a significant contribution to the future energy of the world, especially in developing countries. Hydroelectric power is one of the renewable energy sources that are of great importance in the world's total electricity supply. Hydropower is both a natural energy source and economic. Hydroelectric power plants can help balance supply and demand in electrical energy. They can also play a stabilizing role in the event of interruptions in electricity generation, such as wind and solar energy. Hydropower is associated with the flow of water and the flow of water is the fuel of a hydroelectric power plant (Zhou et al., 2015, Manzano-Agugliaro et al., 2017). The power generated by a turbine was calculated used Equation (1) (Nasir, 2014).

$$P_t = \rho * g * H_n * Q * \eta_t (\text{watt}) \quad (1)$$

where the P_t is the power generated on the turbine shaft,

ρ , water density (1000 kg/m³),

H_n , net height (m),

Q , water flow rate (m³/s),

g , gravitational acceleration constant (9.8 m/s²)

η_t , turbine efficiency (80-90%)

3. Results and Discussion

3.1. Case Study (Head Height is 3 meters)

Equation (1) was used to calculate the amount of energy that can be generated according to the amount of treated wastewater to be passed to the wastewater treatment plants. In this study, η is the efficiency coefficient and it was accepted as 0,80. According to this, using the flow values in Table 4, the power values obtained in Marmara Region for 2017 at a height of 3 meters were obtained as follows:

$E_t = 1359.49$ kWh (hourly),

$E_t = 32627.76$ kWh (daily),

$E_t = 11909132.4$ kWh (yearly),

$E_t = 0.0119$ TWh (yearly),

Similarly, if the predicted electricity generation values of both the other regions and the following years were calculated, the power values in Table 9 were obtained. Accordingly, the predicted annual electricity generation values that can be obtained from wastewater treatment plants in each region between the years of 2017 and 2025 in Turkey at Table 9.

Table 9. Predicted power values for the coming years at a height of 3 meters (Regional)

Years	Predicted Power (TW/year)						
	Marmara	Aegean	Mediterranean	Central Anatolia	Black Sea	Eastern Anatolia	South Eastern Anatolia
2017	0.0119	0.0038	0.0033	0.0041	0.0020	0.0008	0.0013
2018	0.0124	0.0039	0.0035	0.0042	0.0022	0.0009	0.0014
2019	0.0130	0.0041	0.0036	0.0044	0.0025	0.0009	0.0014
2020	0.0135	0.0042	0.0038	0.0045	0.0028	0.0009	0.0015
2021	0.0141	0.0043	0.0040	0.0047	0.0031	0.0010	0.0015
2022	0.0146	0.0045	0.0041	0.0049	0.0035	0.0010	0.0015
2023	0.0151	0.0046	0.0043	0.0050	0.0039	0.0010	0.0016
2024	0.0157	0.0047	0.0045	0.0052	0.0043	0.0011	0.0016
2025	0.0162	0.0049	0.0047	0.0053	0.0047	0.0011	0.0017

When the amount of electrical energy obtained from wastewater treatment plants in Table 9 was examined from 2017 to 2025 years, it was seen that the highest power generation was in Marmara Region and the lowest power generation was in Eastern Anatolia Region. When the electrical power values that could be obtained from wastewater treatment plants were examined between the years of 2017 and 2025, it had been see that there were increases in different rates in each region. These increase rates were 36.13% in Marmara Region, 28.95% in Aegean Region, 42.42% in Mediterranean Region, 29.27% in Central Anatolia Region, 135% in Black Sea Region, 37.5% in Eastern Anatolia Region and 30.77% in Southeast Anatolia Region. It was predicted that the highest annual increase rate would be in the Black Sea Region and the lowest annual average rate of increase would be in Aegean Region. At the end of all these studies, the values of Figure 5 would be obtained by examining the ratio of electricity energy generated from wastewater treatment plants in each region to the ratio of energy consumption of lighting in that region. Figure 5 shows these coverage rates for both 2018 and 2025.

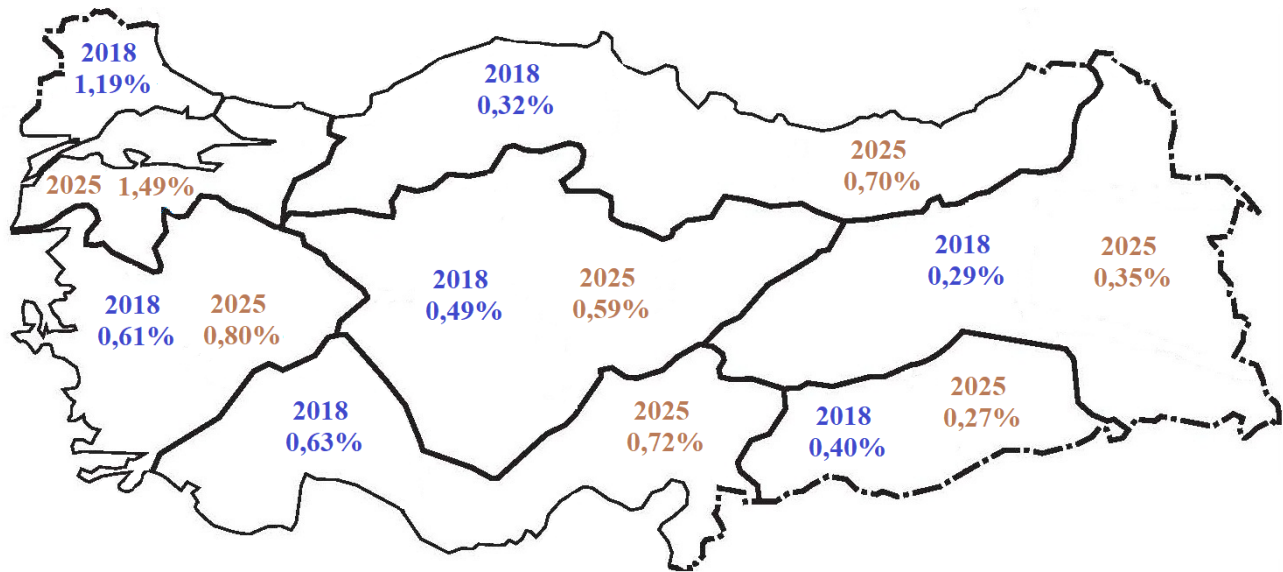


Figure 5. The coverage ratio of wastewater treatment plant hydroelectric generation to urban lighting consumption energy as regional (for 2018 and 2025)

In 2018, the highest coverage rate was realized in Marmara Region, while the lowest coverage rate was in Eastern Anatolia. In 2025, the highest coverage ratio was in the Marmara Region while the lowest coverage rate was in Southeastern Anatolia. From 2018 to 2025, the coverage ratio of wastewater treatment plant hydropower to lighting consumption increased up to 0.31% difference Marmara Region. When other regions were examined, respectively, 0.19% in Aegean Region, 0.09% in Mediterranean Region, 0.10% in Central Anatolia Region, 0.38% in Black Sea Region and 0.05% in Eastern Anatolia Region. In the Southeastern Anatolia Region, it decreased up to 0.13%. It was predicted that the highest increase would be realized in Black Sea Region from 2018 to 2025.

In this study, unlike other studies, the curve fitting method written in Matlab environment was used to obtain predicted values of population, treated wastewater and lighting energy consumption parameters. In addition, a study was conducted on the use of electrical energy to be obtained from treated wastewater in urban lighting. Chae et al. (2015) calculated an annual electricity generation of 68.1 MWh in a municipal WWTP for 4.3 meters of head height. In this study, in the calculations made for 2018 at a height of 3 meters, an annual electricity generation of 2200 MWh for the Black Sea region was calculated. There are 18 provinces in the Black Sea region. The average corresponds to 122 MWh of electrical energy for each province. It was seen that the calculations made were compatible with each other.

4. Conclusions

This study primarily was conducted both hydroelectric generation predicts of wastewater treatment plants in Turkey and total lighting energy consumption values of the cities in each region were predicted. Then, the coverage ratio of these predicted values to each other was determined. For these, predictions were made separately for Turkey's seven geographical regions. In studies, it was assumed that head height 3 meters. With the data obtained, the coverage ratio of the electricity generation of the wastewater treatment plant in each region to the urban lighting consumption was obtained. When the amount of electrical energy obtained from wastewater treatment plants was examined from 2017 to 2025 year, it has been seen that the highest electrical energy generation was in Marmara Region and the lowest electrical energy generation was in Eastern Anatolia Region. In the period from 2017 to 2025 year, it was predicted that electricity generation rates would increase by 36.21% in Marmara Region, 28.39% in Aegean Region, 42.37% in Mediterranean Region, 30.46% in Central Anatolia, 138.58% in Black Sea Region, 31.50% in Eastern Anatolia Region and 25.80% in Southeast Anatolia Region. When the annual increases were examined, the highest average increase was 11.49% in the Black Sea Region and the lowest average increase was 2.91% in Southeastern Anatolia Region. When both the annual increases and the years between 2018 and 2025 were compared, it has been seen that the most remarkable rate of increase has been in the Black Sea region.

Significant results were also obtained in the study on the rate of electrical energy generated from wastewater treatment plants in a region to cover the total lighting energy consumed in the cities in that region. According to these results, the highest coverage ratio in 2018 was realized in Marmara Region, while the lowest coverage rate was in Eastern Anatolia. In 2025, the highest coverage ratio was in the Marmara Region while the lowest coverage rate was in Southeastern Anatolia. From 2018 to 2025 year, the coverage ratio of wastewater treatment plant hydropower to lighting consumption increased by 0.31% difference Marmara Region. When other regions were examined, respectively, 0.19% in Aegean Region, 0.09% in Mediterranean Region, 0.10% in Central Anatolia Region, 0.38% in Black Sea Region and 0.05% in Eastern Anatolia Region. In the Southeastern Anatolia Region, it decreased by 0.13%. It was predicted that the highest increase would be realized in Black Sea Region from 2018 to 2025. However, some characteristics of the system (changes in flow rate, climate etc.) were not modeled in the prediction model here. There may be some deviations in the predictions depending on these characteristics which were not considered. Accordingly, considering the predicted electricity generation values obtained from this study, it can be considered as a secondary source for meeting the future electricity needs of cities.

Referanslar

Abbas, A.I., Qandil, M.D., Al-Haddad, M.R., Saravani, M.S. (2018). Amano, R.S., Utilization of Hydro-Turbines in Wastewater Treatment Plants. ASME 2018 12th International Conference on Energy Sustainability collocated with the ASME 2018 Power Conference and the ASME 2018 Nuclear Forum, ES2018-7349 (V001T01A003) 7 pages. <https://doi.org/10.1115/ES2018-7349>.

Ak, M., Kentel, E. & Kucukali, S. (2017). A fuzzy logic tool to evaluate low-head hydropower technologies at the outlet of wastewater treatment plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68 (1) 727-737. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.010>.

Baran, B. (2019). Sınır Değerler Arasında Kalan Evsel Atıksu Numune Analizi Sonucunun Aşırı Öğrenme Makineleri İle Sınıflandırılması. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 7(1) 18–25, (2019). <https://doi.org/10.21923/jesd.457085>.

Berger, V., Niemann, A., Frehmann, T., Brockmann, H. (2013). Advanced energy recovery strategies for wastewater treatment plants and sewer systems using small hydropower. *Water Utility Journal*, 5, 15-24.

Bhandari, B., Poudel, S.R., Lee, K.T. & Ahn, S.H. (2014). Mathematical Modeling of Hybrid Renewable Energy System: A Review on Small Hydro-Solar-Wind Power Generation. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1(2), 157-173. doi: 10.1007/s40684-014-0021-4.

- Bousquet, C., Samora, I., Manso, P., Rossi, L., Heller, P. & Schleiss, A.J. (2017). Assessment of hydropower potential in wastewater systems and application to Switzerland. *Renewable Energy*, 113, 64-73. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.062>.
- Chae, K.J., Kim, I.S., Ren, X. & Cheon, K.H. (2015). Reliable energy recovery in an existing municipal wastewater treatment plant with a flow-variable micro-hydropower system. *Energy Conversion and Management*, 101, 681-688. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.016>.
- Curve Fitting. 2018. Curve Fitting Method. Retrieved from www.yildiz.edu.tr/~nguzel/Egri_Uydurma_ve_En_Kucuk_Kareler_Yontemi.docx.
- EPDK. (2019). Republic of Turkey Energy Market Regulatory Authority, Development Reports, Retrieved from <https://www.epdk.org.tr/Home/En>.
- Frijns, J., Hofman, J., Nederlof, M., 2013. The potential of (waste)water as energy carrier. *Energy Conversion and Management*, 65, 357-363. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.08.023>.
- Gu, Y., Li, Y., Li, X., Luo, P., Wang, H., Robinson, Z.P., Wang, X., Wu, J. & Li, F. (2017). The feasibility and challenges of energy self-sufficient wastewater treatment plants. *Applied Energy*, 204, 1463-1475. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.069>.
- Hydroelectric-1. (2019). Hydroelectric Power. Retrieved from https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/hydroelectric-power-how-it-works?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects.
- Hydroelectric-2. (2019). Hydroelectric Power. Retrieved from <https://www.conserve-energy-future.com/howhydropowerplantsworks.php>.
- Hydroelectric-3. (2019). Principle of hydropower Generation. Retrieved from <https://www.brighthubengineering.com/fluid-mechanics-hydraulics/7066-principle-of-hydropower-generation>.
- Hydroelectric-4. (2019). Hydroelectric Power. Reclamation Managing Water in the West. Retrieved from <https://www.usbr.gov/power/edu/pamphlet.pdf>.
- Kose, F & Kaya, M.N. (2013). Analysis on meeting the electric energy demand of an active plant with a wind-hydro hybrid power station in Konya, Turkey: Konya water treatment plant. *Renewable Energy*, 55, 196-201. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.047>.
- Kollmann, R., Neugebauer, G., Kretschmer, F., Truger, B., Kindermann, H., Stoeglehner, G., Ertl, T. & Narodoslowsky, M. (2017). Renewable energy from wastewater - Practical aspects of integrating a wastewater treatment plant into local energy supply concepts. *Journal of Cleaner Production*, 155, 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.168>.
- Manzano-Agugliaro, F., Taher, M., Zapata-Sierra, A., Juaidia, A. & Montoya, F.G., (2017). An overview of research and energy evolution for small hydropower in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 476-489. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.013>.
- Nasir, B.A. (2014). Design Considerations Of Micro-Hydro-ElectricPowerPlant, The International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy. Environment andSustainability, TMREES14. *Energy Procedia*, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.003>.
- Nimje, A.A. & Dhanjode, G. (2015). Pico-Hydro-Plant for Small Scale Power Generation in Remote Villages. *IOSR Journal of Environmental Science. Toxicology and Food Technology (IOSR-JESTFT)*, 9(1)(3) 59-67.
- Power, C., McNabola, A. & Coughlan, P. (2014). Development of an evaluation method for hydropower energy recovery in wastewater treatment plants: Case studies in Ireland and the UK. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 7, 166-177. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.06.001>.
- Tamrakar, A., Pandey, S.K. & Dubey, S.C. (2015). Hydro Power Opportunity in the Sewage Waste Water. *American International Journal of Research in Science. Technology, Engineering & Mathematics*, 10 (2) 179-183.
- TUIK. (2019). Turkish Statistical Institute. Turkey's population and wastewater amount of data. Retrieved from www.turkstat.gov.tr.
- Yah, N.F., Oumer, A.N. & Idris, M.S. (2017). Small scale hydro-power as a source of renewable energy in Malaysia: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 228-239. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.068>.

- Zarfl, C., Lumsdon, A.E., Berlekamp, J., Tydecks, L. & Tockner, K. (2015). A global boom in hydropower dam construction. *Aquatic Sciences*, 77(1) 161–170. doi: 10.1007/s00027-014-0377-0.
- Zhou, D. & Deng, Z.D. (2017). Ultra-low-head hydroelectric technology: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.086>.
- Zhou, Y., Hejazi, M., Smith, S., Edmonds, J., Li, H., Clarke, L., Calvin, K. & Thomson, A. (2015). A Comprehensive View of Global Potential for Hydro-generated Electricity. *Energy and Environmental Sciences*, 9. doi: 10.1039/C5EE00888C.